

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## ANALÝZA PROVOZU BEZDRÁTOVÉ SÍTĚ

ANALYSIS OF WIRELESS NETWORK TRAFFIC

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Martin Guznar**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Bohumil Novotný**

**BRNO 2017**



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**

Ústav telekomunikací

**Student:** Martin Guznar

**ID:** 164896

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2016/17

**NÁZEV TÉMATU:**

## Analýza provozu bezdrátové sítě

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V bakalářské práci se student seznámí s mechanismem přepnutí hovoru z technologie VoLTE na VoWiFi beze ztráty spojení. Následně bude přepnutí analyzováno a patřičně zdokumentováno. Hlavní pozornost bude věnována dodržení kvality služeb (QoS) při tomto jevu a výsledky budou prezentovány v grafické podobě. Následujícím úkolem bude sestavení sítě využívající handover v LTE, změření totožných parametrů mezi přístupovými body LTE a porovnání parametrů QoS simulovaných handoverů mezi VoLTE a datovým hovorem LTE, mezi dvěma přístupovými body LTE a mezi více přístupovými body LTE sítě. Výsledky budou prezentovány graficky a řádně okomentovány.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] HOŠEK, Jiří. Handover in LTE Network [online]. Frymburk, 2014 [cit. 2017-01-17]. ISBN 978-80-01-05539-7. Dostupné z: [https://kto.vsb.cz/opvk/RTT2014\\_Workshop\\_final.pdf](https://kto.vsb.cz/opvk/RTT2014_Workshop_final.pdf)

[2] BÉNÉZIT, F. Distributed average consensus for wireless sensor networks. PhD Thesis. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, 2009.

**Termín zadání:** 1.2.2017

**Termín odevzdání:** 8.6.2017

**Vedoucí práce:** Ing. Bohumil Novotný

**Konzultant:**

**doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
*předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Tato práce v první fázi popisuje přepnutí hovoru v systému android z VoLTE na VoWiFi beze ztráty spojení. V teoretické části jsou podrobněji popsány jednotlivé standardy, jejich protokoly a jejich propojení. Navržený test bude v systému android s probíhajícím VoIP hovorem. Výstupem budou grafy QoS jednotlivých handoverů a, to vše beze ztráty spojení a přerušení probíhajícího hovoru. Výsledky této práce umožní zjistit jak a za jakých okolností dojde k přepnutí sítě z WiFi na LTE, dále umožní získat data, která mezi tím probíhají a přesný popis procedury Soft Handoveru. V druhé fázi se bude jednat o přepnutí hovoru z technologie VoLTE na VoWiFi taktéž beze ztráty spojení. Následně bude přepnutí analyzováno a zdokumentováno. Hlavní pozornost bude věnována dodržení kvality služeb (QoS) při tomto jevu. Výsledky budou prezentovány graficky.

## KLÍČOVÁ SLOVA

LTE, VoIP, Wifi, přepnutí, android, bezešvé, PBX, android, VoLTE, VoWiFi

## ABSTRACT

In the first phase this work describes the VoIP call handover between Long Term Evolution (LTE) and IEEE 802.11 standard using Android OS without connection loss. Various standards, their protocols and interconnection are described in the theoretical part. The proposed test will be conducted using Android OS with an ongoing VoIP call. The outcome should be a WiFi signal loss graph and connection to an LTE network using a Local provider without interrupting the ongoing VoIP call. The results of this study make it possible to determine how and under what circumstances the WiFi to LTE handover occurs, as well as obtain the transmitted data and an exact description of the Soft Handover procedure. The second phase is aimed at analysis and documentation of switching from VoLTE to VoWiFi without losing connection. The main attention will be paid to maintaining the quality of service (QoS) during the switch. The results will be presented in graphical form.

## KEYWORDS

LTE, VoIP, Wifi, handover, android, seamless, android, VoLTE, VoWiFi

GUZNAR, Martin *Analýza provozu bezdrátové sítě*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2017. 75 s. Vedoucí práce byl Ing. Bohumil Novotný.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Analýza provozu bezdrátové sítě“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Bohumilu Novotnému za odborné vedení, konzultace, trpělivost, podnětné návrhy k práci a za vynikající přístup ke studentům. Dále taky své rodině a svým blízkým za podporu, protože ví jak to měl můj vedoucí se mnou těžké a já s touto prací. V neposlední řadě bych rád poděkoval Bc. Michaelle Vrbkové, Natálii Brestovanské a Martinu Kuličovi za nebetyčnou trpělivost v mých nejslabších chvílích.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)

## PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno .....

.....  
podpis autora(-ky)

# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>12</b>
<b>1 Historie</b>	<b>13</b>
1.1 Historie bezdrátových sítí a komunikace . . . . .	13
1.2 Standard 802.11 . . . . .	13
1.3 Standard GSM . . . . .	13
1.4 Technologie pro bezdrátové sítě . . . . .	14
1.4.1 Princip bezdrátových sítí . . . . .	14
1.4.2 Používané modulace . . . . .	15
<b>2 Rozdělení bezdrátových sítí</b>	<b>17</b>
2.1 Optické sítě . . . . .	18
2.1.1 Technologie optických bezdrátových sítí . . . . .	18
2.2 Rádiové sítě . . . . .	19
2.2.1 FWA . . . . .	19
2.2.2 WiMAX . . . . .	19
2.2.3 Satelitní spoje . . . . .	19
2.2.4 WiFi . . . . .	19
<b>3 Mobilní síť - GSM</b>	<b>20</b>
3.1 Síť 1. generace (GSM) . . . . .	20
3.2 Síť 2. generace (2G) . . . . .	21
3.3 Síť 3. generace (3G UMTS) . . . . .	22
3.3.1 Struktura UMTS sítě . . . . .	22
3.3.2 Síť 3,5. generace (HSDPA a HSUPA) . . . . .	22
3.4 Síť 4. generace - 4G (LTE a LTE-A) . . . . .	22
3.5 Technologie 5G v mobilních sítích . . . . .	23
3.6 Internet of Things (IoT) . . . . .	24
3.6.1 SigFox . . . . .	24
3.6.2 LoRa . . . . .	24
<b>4 LTE</b>	<b>25</b>
4.1 Topologie LTE . . . . .	25
4.1.1 E-UTRAN . . . . .	25
4.1.2 Evolved Packet Core (EPC) . . . . .	27
4.2 Protokolová architektura LTE . . . . .	28
4.2.1 Uživatelské protokoly LTE . . . . .	28
4.2.2 Řídící protokoly LTE . . . . .	30



4.3	Fyzické a logické kanály v LTE . . . . .	30
4.4	Přístup k internetu v LTE . . . . .	31
4.5	Přenos hovoru v LTE . . . . .	33
4.5.1	CSFB . . . . .	33
4.5.2	Simultaneous voice and LTE (SVLTE) . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Handover (přepnutí)</b>	<b>35</b>
5.1	Handover v LTE . . . . .	35
5.2	Intra-LTE handover . . . . .	35
5.2.1	Intra-MME   SGW: Předání pomocí rozhraní X2 . . . . .	35
5.2.2	Intra-MME   SGW: Předání pomocí S1 rozhraní . . . . .	35
5.3	Inter-LTE handover . . . . .	36
5.3.1	Inter-MME handover . . . . .	36
5.3.2	Inter-MME   SGW handover . . . . .	36
5.4	Inter-RAT handover . . . . .	36
5.5	Soft and softer Handover v UMTS . . . . .	36
5.5.1	Softer Handover . . . . .	37
5.5.2	Soft Handover . . . . .	37
5.5.3	Soft Handover Algorithm . . . . .	38
<b>6</b>	<b>VoIP</b>	<b>39</b>
6.1	Charakteristika VoIP . . . . .	39
6.1.1	Protokoly používané ve VoIP . . . . .	39
6.1.2	Kodeky používané ve VoIP . . . . .	40
6.1.3	Protokol SIP . . . . .	41
6.1.4	Síťové prvky SIP . . . . .	42
6.1.5	Adresace v SIP . . . . .	42
6.1.6	Struktura zprávy SIP . . . . .	42
6.1.7	Zprávy v SIP . . . . .	43
<b>7</b>	<b>Kvalita služeb (QoS)</b>	<b>44</b>
7.1	QoS v LTE . . . . .	44
7.2	Problematika QoS . . . . .	45
7.2.1	Mechanismy zajištění QoS . . . . .	45
<b>8</b>	<b>VoLTE a VoWiFi</b>	<b>47</b>
8.1	VoLTE . . . . .	47
8.1.1	Kvalita hlasu . . . . .	47
8.2	VoWiFi . . . . .	48
8.3	Handover mezi VoLTE a VoWiFi . . . . .	48

8.4	IP Multimedia Subsystem (IMS) . . . . .	50
8.5	Evolved Packet System (EPS) . . . . .	51
<b>9</b>	<b>Praktická část</b>	<b>52</b>
9.1	Základní topologie sestavené sítě . . . . .	52
9.2	Handover v LTE - Inter-MME využívající X2 a Inter-RAT) . . . . .	52
9.3	Handover VoLTE a VoWiFi . . . . .	53
9.4	Sestavení sítě pomocí virtuálního PBX (Asterisk) . . . . .	54
9.5	Sestavení sítě pomocí hostovaného PBX na Google Cloud . . . . .	55
9.6	Sestavení sítě pomocí hostovaného PBX 3CX . . . . .	55
9.7	Nastavení koncových zařízení . . . . .	55
9.7.1	Nastavení PC - Linphone . . . . .	55
9.7.2	Nastavení mobilního zařízení (UE) - Andoid . . . . .	55
9.8	Porovnání handoveru QoS VoLTE a VoWifi . . . . .	57
9.8.1	Graf QoS handoveru VoLTE, VoWifi . . . . .	61
<b>10</b>	<b>Závěr</b>	<b>67</b>
	<b>Literatura</b>	<b>69</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>73</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>74</b>
<b>A</b>	<b>Přílohy</b>	<b>75</b>
A.1	Tabulka ISM pásma . . . . .	75

# SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Jednotlivá okna Útlumové charakteristiky . . . . .	18
3.1	Základní schéma síťové architektury . . . . .	20
3.2	Topologie 2G . . . . .	21
4.1	Topologie sítě LTE [31] . . . . .	25
4.2	Uživatelská rovina LTE . . . . .	29
4.3	Řídící rovina LTE . . . . .	30
4.4	Od UE do Internetu . . . . .	31
4.5	Z Internetu do UE . . . . .	32
4.6	Diagram toku zpráv pro CSFB (LTE do 3G (UMTS)) [31] . . . . .	33
6.1	Používané kodeky a jejich specifikace [32] . . . . .	40
7.1	Standardizované třídy identifikátorů QoS (QCI) v LTE [31] . . . . .	45
8.1	Princip VoLTE [31] . . . . .	47
8.2	SIP v LTE [31] . . . . .	48
8.3	Úspěšné volání VoLTE [31] . . . . .	48
8.4	Signalizace a trasa dat v IMS . . . . .	49
8.5	Volání přes CS, VoLTE, CSFB a SRVCC . . . . .	50
9.1	Topologie sítě . . . . .	52
9.2	Inter-MME handover přes X2 . . . . .	53
9.3	Inter-MME call flow . . . . .	53
9.4	Virtuální pobočková ústředna . . . . .	54
9.5	Porovnání kodeků . . . . .	56
9.6	Rozdělení LTE QoS . . . . .	56
9.7	Srovnání audio kodeků dle kvality a bitrate . . . . .	57
9.8	3GPP VCC: Registrace . . . . .	57
9.9	Srovnání tříd kvality u LTE QoS . . . . .	58
9.10	Porovnání kodeků - MOS9 . . . . .	58
9.11	Handover Wifi-LTE a LTE-WiFi - flow graf . . . . .	59
9.12	Architektura mobilních sítí . . . . .	59
9.13	QoS Handoveru VoLTE a VoWifi . . . . .	60
9.14	1.Přepnutí z WiFi na LTE . . . . .	62
9.15	1.Přepnutí z WiFi na LTE - flow graf . . . . .	63
9.16	Přepnutí z VoLTE na VoWiFi - flow graf . . . . .	64
9.17	Handover z WiFi na LTE - flow graf . . . . .	65
9.18	Handover z VoWiFi na VoLTE - flow graf - virtuální PBX . . . . .	66
9.19	Handover z VoWiFi na VoLTE - flow graf - hostované PBX . . . . .	66
A.1	Tabulka ISM pásma [33] . . . . .	75

## SEZNAM TABULEK

3.1	Odhadovaná maximální rychlost mobilních sítí . . . . .	23
6.1	Tabulka zpráv typu Odpověď . . . . .	43
9.1	Porovnání QoS handoveru sítí (Jitter[ms], Delay[ms], Packet Loss[%])	58

# ÚVOD

Bezdrátové sítě jsou hojně používány ve všech oblastech lidské komunikace a přenosu dat. Díky rychlému vývoji v teoretické i praktické rovině se bezdrátové sítě staly nejpoužívanější komunikační technologií. V dnešní době, kdy je nedílnou součástí každého z nás mobilní telefon (smartphone) se ani nepozastavujeme nad tím, jak věci přesně fungují, ale očekáváme od nich spolehlivost a jednoduchost. Díky tomu vedení videohovoru vysokoškolské konference mezi VUT a Harvardem na téma globální oteplování neznamena žádný větší problém. Bezdrátové sítě umožňují telekomunikaci na vysoké úrovni (4G LTE-A) a videohovory přes internet pomocí protokolu VoIP. Chceme-li hlídat parkovací místo nebo otevřít vrata od garáže pomocí hlasového příkazu, takové řešení si koupíme nebo vyrobíme díky levným mikrokontrolérům (Arduino, Raspberry Pi). Také se nyní rozmáhá Internet of Things (IoT), kde hraje hlavní roli síť SigFox, která nyní pokrývá téměř 90 procent České republiky. Její nevýhodou je, že lze posílat pouze impulsy dat o velikosti 12 Bytů. Takových impulsů lze poslat maximálně 140 denně. Pro potřeby IoT je to dostačující a různorodá čidla díky tomu vydrží fungovat až několik desítek let bez výměny baterie. Na podobném principu pracuje i konkurenční LoRa.

Bezdrátové technologie byly ještě před několika lety drahé, avšak díky nasazení v armádním a soukromém sektoru, IoT a implementaci pokročilých technologií je jejich výroba a provoz jednodušší a méně nákladný. Bezdrátové technologie mohou pracovat ve volném (bezlicenčním) pásmu, ISM (Industrial, Scientific and Medical) A.1 a v licencovaném pásmu. Volné pásmo je vyhrazeno pro průmyslové, vědecké a lékařské účely. ISM pásmo používá mnoho přístrojů využívajících radiové vlny. Provoz v licenčním pásmu se platí, proto bylo ISM pásmo uvolněno americkým regulátorem FCC (Federal Communications Commission) i evropským ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Provoz bezdrátových sítí v ISM pásmu má nižší náklady a umožňuje širší nasazení. Nevýhodou této technologie je riziko vzájemného rušení (LTE a HDBT2 se v České republice vzájemně ruší). Při použití licencovaných pásem by se mělo vzájemné rušení minimalizovat. Mezi takové technologie patří např. GSM (mobilní telefony) nebo nastupující LTE. Bezdrátová technologie WiMAX využívá licencovaného pásma 3,5 GHz v ČR.

V teoretické části práce je řešena a popsána technologie bezdrátových sítí, především WiFi a LTE.

V praktické části se tato práce zabývá vytvářením sítě a testováním VoIP hovorů při dodržení QoS na různých platformách (Windows, Linux, Android).

# 1 HISTORIE

## 1.1 Historie bezdrátových sítí a komunikace

Za průkopníka bezdrátové komunikace je považován Guglielmo Marconi, avšak jejím skutečným objevitelem je Nikola Tesla, který objev učinil o několik let dříve. Marconi roku 1895 přenesl informaci na vzdálenost dvou kilometrů, o šest let později došlo k prvnímu transatlantickému bezdrátovému přenosu dat. V počátcích bezdrátové komunikace se přenášela informace za pomoci Morseovy abecedy, avšak již v roce 1904 se uskutečnil první bezdrátový přenos lidského hlasu. Začátkem roku 1934 byla demonstrována frekvenční modulace (FM), která na rozdíl od amplitudové modulace (AM) umožnila kvalitnější přenos zvuku. Koncem roku 1980 se začaly objevovat první digitální radiotelefonní systémy, z nichž v Evropě byl nejúspěšnější systém GSM. Koncem dvacátého století začaly rapidně nastupovat digitální systémy, které téměř vytlačily systémy analogové. Nástup vysokorychlostních bezdrátových komunikací a sítí, umožnil rozvoj techniky využívající frekvence řádově desítek GHz.

## 1.2 Standard 802.11

Tento standard byl v roce 1997 popsán Institutem pro elektrotechnické a elektronické inženýrství. Do té doby na trhu působila řada firem vyrábějících zařízení různých standardů pro bezdrátovou komunikaci v pásmu ISM. Většina z nich akceptovala společnou normu IEEE 802.11, která umožnila vzájemnou kompatibilitu. V roce 1999 přišly standardy IEEE 802.11a a IEEE 802.11b, k nimž byl v roce 2003 přidán standard 802.11g.

## 1.3 Standard GSM

V roce 1982 byla založena skupina Groupe Spécial Mobile (GSM), která navrhla první verzi stejnojmenného standardu. Technické základy systému GSM byly definovány v roce 1987 a v roce 1991 byla vydána první část GSM - Phase 1. O čtyři roky později se vývoj dostal do druhé fáze, GSM - Phase 2, na kterou navazuje GSM - Phase 2+ vydaná v roce 1996. Roku 1998 byl zformován Projekt Partnerství 3. Generace (3GPP). Původně měl pouze vytvořit specifikaci pro třetí generaci mobilních sítí (3G), avšak také převzal údržbu a vývoj GSM specifikace. Standard 3G přichází o několik měsíců později. Jeho následovníkem je standard 4G LTE z roku 2008. V březnu 2011 byl standardizován LTE Advanced jako 3GPP Release 10.

## 1.4 Technologie pro bezdrátové sítě

### 1.4.1 Princip bezdrátových sítí

Bezdrátové sítě jsou obecně veškeré sítě, kterými lze přenášet data bez přítomnosti kabelů, využívající k přenosu elektromagnetické vlnění na různých frekvencích. Bezdrátové sítě jsou používány v místech, kde nejde z hlediska výstavby sítě či financí použít kabelové spojení.

Bezdrátové sítě se dělí na optické, sonické a rádiové podle typu nosného média. Tyto technologie mohou mít mezi komunikujícími body vzdálenost od centimetrů (IrDA) až po miliony kilometrů (družice v kosmickém prostoru). Bezdrátové spojení je definováno jako obor v telekomunikacích. Díky jejich širokému uplatnění se poptávka po těchto technologiích stále zvyšuje.

V bezdrátových sítích se data přenáší následovně: Jednotlivé bity jsou modulovány na základní nosnou frekvenci, proto musí být frekvence přenášených dat menší než nosná frekvence. Konkrétní hodnotu potřebné modulace lze vypočítat pomocí Shannonova vzorkovacího teorému, kde  $f_v$  je frekvence vzorkování a  $f_{max}$  je maximální frekvence, která se u signálu vyskytuje.

$$f_v > 2f_{max}[Hz] \quad (1.1)$$

Z toho vyplývá, že pro nosnou frekvenci 5 GHz je maximální teoretická rychlost přenosu 2,5 GHz. V praxi nelze této rychlosti dosáhnout, proto se uplatňují užitečné rychlosti minimálně o jeden řád nižší. Výrobci se tedy snaží vyrábět zařízení, která využívají vyšší frekvence na kratší vzdálenosti, protože se vzrůstající frekvencí se zhoršuje prostupnost materiálem. Dále se výrobci snaží tyto frekvence různými způsoby modulovat a upravovat kódování, aby se zvýšila celková přenosová rychlost. Výpočet vlnové délky pro elektromagnetické vlnění:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.2)$$

$\lambda$  je vlnová délka,  $c$  je rychlost světla (300 000 000 m/s),  $f$  je frekvence.

V praxi se počítá vlnová délka nejčastěji v radiotechnice, proto se používá zjednodušený vzorec.

$$\lambda = \frac{300}{f}[mm] \quad (1.3)$$

Frekvence v [MHz] a vlnová délka v metrech [m].

Frekvence v [GHz] a vlnová délka v milimetrech [mm].

## 1.4.2 Používané modulace

### 802.11

**FHSS** je nenáročné na zpracování signálu, avšak citlivé na časovou synchronizaci. Jedná se o modulaci na principu frekvenčních přeskoků – systém jednou za cca 400 ms (dle aplikace a nastavení) náhodně přeskóčí na jinou frekvenci (celkem 79 nezávislých kanálů), což má za následek vysokou odolnost proti rušení, ale nízkou propustnost (max. 2 Mbps). FHSS se téměř nepoužívá kvůli nadřazenosti ostatních modulací.

**DSSS** je náročnější na zpracování signálu (rychlý sériový přenos). Všechna data jsou přenášena v jednom zhruba 22 MHz širokém kanálu (čím vyšší rychlost, tím větší šířka pásma).

**PBCC** vychází z principů DSSS a je s ním zpětně kompatibilní, definuje přibližně  $2\times$  širší pásmo.

**OFDM** je širokopásmová modulace využívající frekvenční dělení kanálu. Pracuje s rozprostřeným spektrem, kdy je signál vysílán na více vzájemně ortogonálních frekvencích, které jsou označovány jako subnosné. Protože jsou datové toky na jednotlivých subnosných frekvencích malé, je možné vkládat ochranný interval (GI) – čas, kdy se nevysílá žádná nová informace. Na přijímací straně je tak možné nerušeně přijmout právě vysílaný symbol, i když přichází k přijímači více cestami s různým zpožděním.

**QAM** využívá dvojici sinusových signálů s konstantním kmitočtem vzájemně fázově posunutých o  $90^\circ$  - kvadraturní nosné nebo kvadraturní komponenty.

**QPSK** je formou PSK (viz níže), kdy jsou dva bity modulované najednou jedním ze čtyř možných posunů nosné fáze. QPSK umožňuje přenášet dvakrát tolik informací než PSK při využití stejné šířky pásma. QPSK se například používá pro satelitní vysílání MPEG2 videa, kabelové modemy, videokonference, mobilní telefonní systémy a jiné formy digitální komunikace.



## Mobilní sítě - GSM

**GMSK** je dvoustavová modulace založená na klíčování frekvenčním zdvihem (posuvem) a je speciálním druhem modulace CPM (modulace se spojitou fází - Continuous Phase Modulation).

**FSK** je metoda frekvenční modulace, u které se informace přenáší pomocí diskrétních změn frekvence nosné vlny.

**PSK** je metoda digitální modulace, která pro přenos informací používá změny fáze referenčního signálu (nosné vlny).

**MSK** je zvláštním případem modulace FSK, u níž dochází ke spojitě změně kmitočtu neboli ke spojitě změně fáze. MSK značí dvoustavové kmitočtové klíčování s minimálním zdvihem. Spojitě fáze je u MSK dosaženo splněním podmínky, kde se kmitočtový zdvih musí rovnat čtvrtině bitového (modulačního) kmitočtu a zároveň signalizační kmitočty musejí být jeho násobky.

## 2 ROZDĚLENÍ BEZDRÁTOVÝCH SÍTÍ

Bezdrátové sítě lze dělit několika způsoby: Podle přenosového média:

- **optické**
- **rádiové**

Podle mobility:

- **mobilní sítě** - umožňují volný pohyb v rámci sítě i mezi sítěmi
- **pevné bezdrátové sítě** - umožňují jen velice omezený nebo žádný pohyb

Podle dosahu bezdrátových sítí:

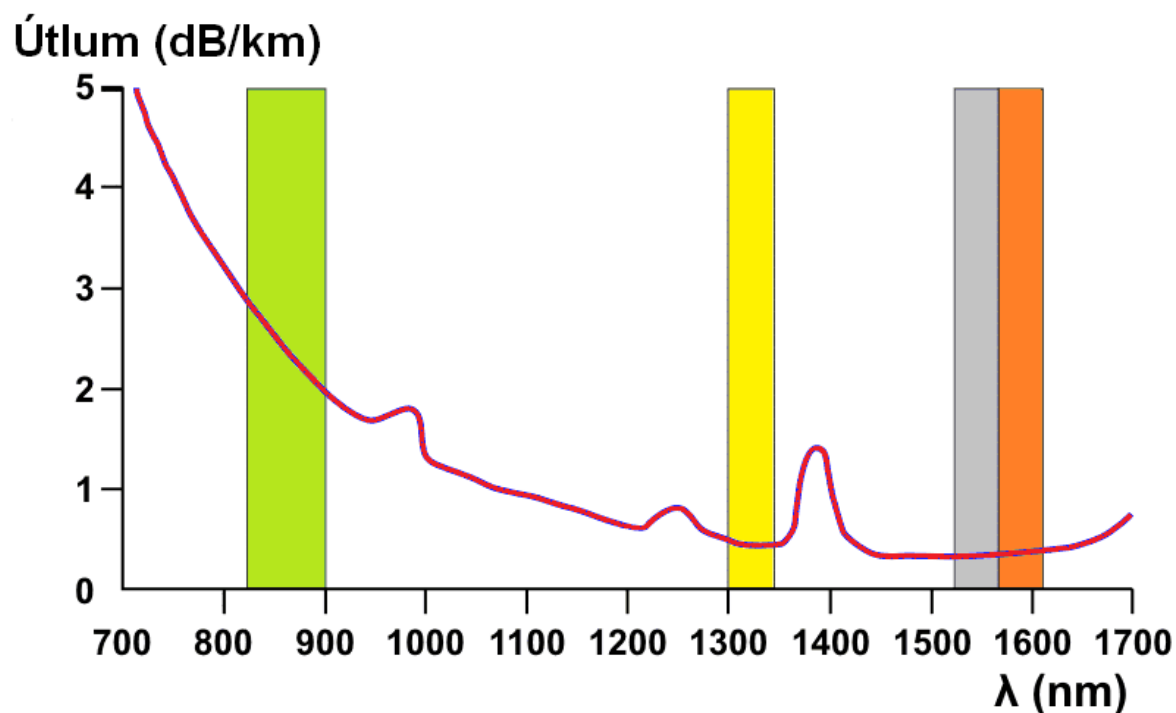
- **bezdrátové osobní sítě (WPAN)** – dosah do 10 metrů. Sítě Bluetooth (Class 2,3 a Verze 4), ZigBee, IrDA, Ultra Wide Band - UWB a na něm založené WirelessUSB – WUSB(802.15).
- **bezdrátové lokální sítě (WLAN)** – dosah do 100 metrů. Patří zde sítě Bluetooth (Class 1), WiFi.
- **bezdrátové metropolitní sítě (WMAN)** – dosah do 50 km. WiMax(802.16).
- **nízkopříkonové rádiové sítě (LPWAN)** – dosah 50 km a více. Sigfox, LoRa.
- **bezdrátové rozlehlé sítě (WWAN)** – dosah 100 km a více. Sítě GSM (s technologiemi GPRS a EDGE), UMTS ( HSDPA a HSUPA) či síť CDMA2000 (s technologiemi CDMA2000 1xEV-DO a CDMA2000 1xRTT), LTE, LTE advanced, 5G.

Nejčastěji se používá dělení dle přenosového média a podle dosahu. O normalizaci těchto sítí se snaží institut IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).

## 2.1 Optické sítě

### 2.1.1 Technologie optických bezdrátových sítí

Pro přenos se používají optické pulsně modulované signály s frekvencí 100-1000 THz. Je využíváno světlo mezních vlnových délek, které se označují jako útlumová okna. Při vývoji optických vláken byly hledány vhodné frekvenční rozsahy. Nejefektivněji z toho vzešla právě tato čtyři okna, kde vlákno vykazuje nejnižší útlumy. Vláknem vyznačuje nejmenší útlumy právě u těchto čtyř oken uvedených na obr. 2.1.



Obr. 2.1: Jednotlivá okna Útlumové charakteristiky

## **2.2 Rádiové sítě**

### **2.2.1 FWA**

Bezdrátová síť typu point-to-multipoint. Skládá se ze základnových stanic (uzlů) a uživatelských terminálů. Základnová stanice je napojena na páteřní síť a distribuuje datový tok směrem k uživatelským stanicím. Tyto sítě jsou kvalitativně srovnatelné se sítěmi optickými.

### **2.2.2 WiMAX**

Jedná se o bezdrátovou metropolitní síť, která byla vytvořena v roce 2003 společně s normou IEEE 802.16a. Tato technologie typu point-to-multipoint pracuje v pásmu 2 až 11 GHz.

### **2.2.3 Satelitní spoje**

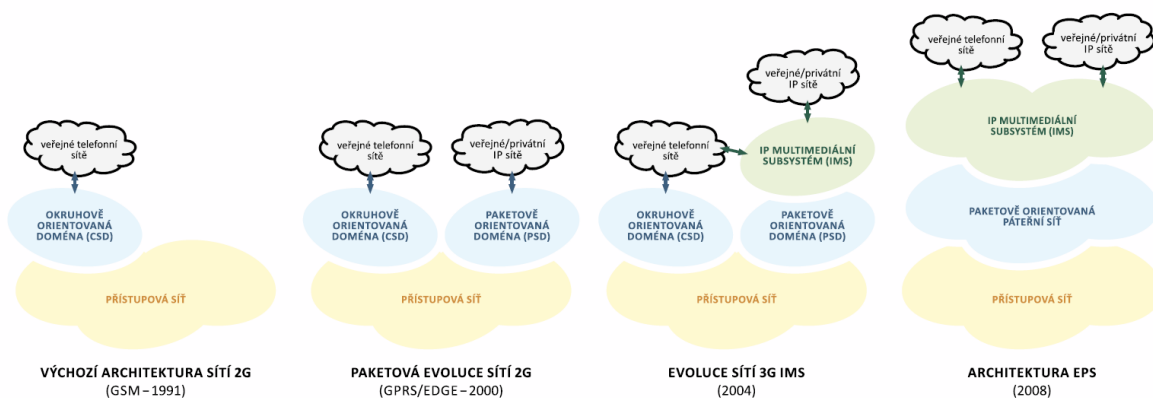
Aktivní družice pomocí transpondérů přijímají signál vysílaný ze Země, převádí ho do jiného frekvenčního pásma a vysílají zpět k Zemi. Družice obvykle vysílají v rozmezí 4 až 30 GHz. Nevýhodou této technologie je značné zpoždění vznikající při přenosu.

### **2.2.4 WiFi**

Zkratka pro "Wireless Fidelity". Jde o souhrnné označení bezdrátových sítí (WLAN), které se řídí podle specifikace normy IEEE 802.11. WiFi byla původně určena jen jako náhrada metalických rozvodů místních sítí. Spoje WiFi mohou být typu Point to Point, Bridge a nebo Point to Multipoint. Mezi výhody patří snadnost instalace, nízká cena a nepřehrné množství výrobků na trhu. Z toho ale i vyplývají jejich hlavní nevýhody. Všechna větší města jsou velmi zarušena a je prakticky nemožné najít volný kanál pro svou WiFi, tak aby nebyl signál nijak rušen.

### 3 MOBILNÍ SÍŤ - GSM

GSM je celulární síť - mobilní telefony se připojují do sítě prostřednictvím nejbližší buňky (přístupové stanice - BTS). GSM síť funguje na několika radiových frekvencích, které jsou licencované.



Obr. 3.1: Základní schéma síťové architektury

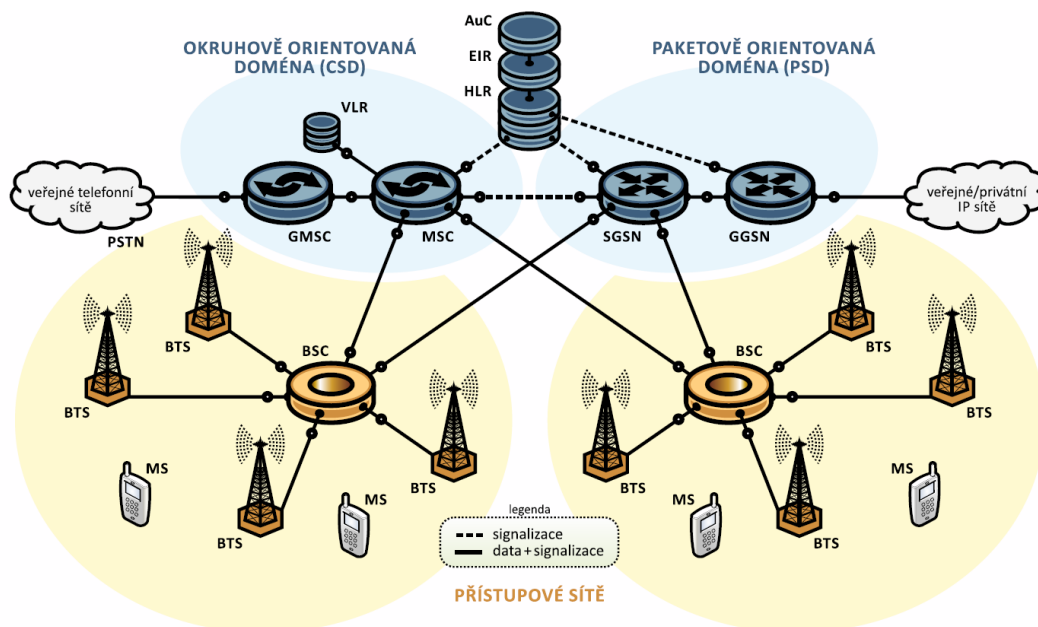
#### 3.1 Síť 1. generace (GSM)

Jedná se o analogovou radiotelefonní síť, která byla vystavěna v roce 1980 a po roce 1995 byla nahrazena 2. generací. Využívala rádiové rozhraní FDMA (Frequency Division Multiple Access). Tyto analogové sítě měly nízkou kapacitu, velmi špatnou kvalitu hlasu a nepoužívaly žádné šifrování. Přenos signálu byl pouze namodulován na vyšší frekvenci, obvykle na 150 MHz. Pro tyto sítě vzniklo několik systémů, například první komerční systém NMT (Nordic Mobile Telephone), který byl využíván primárně v severských zemích Evropy. NMT využívá frekvenci v okolí 450 MHz. V USA vznikl AMPS (Advanced Mobile Phone System), který byl využíván od roku 1982 a pracoval na frekvenci 850 MHz.

## 3.2 Síť 2. generace (2G)

Tato síť byla spuštěna v roce 1991, kdy pracovní skupina GSM navrhla první verzi standardu pro mobilní telekomunikaci. Tento systém používající digitální technologii byl navržen pro přenos hovorů i signalizaci pro připojení k základnové stanici. Díky použití digitální technologie umožňuje kromě volání i poskytování dalších služeb, mj. komunikaci pomocí zpráv (SMS), zobrazování čísla volajícího, hlasová schránka, přesměrování hovorů, datový přenos a dalších. Digitalizace také s sebou přinesla zvýšení kvality hovoru a šifrování přenášených dat. Časové dělení (TDMA - Time Division Multiple Access), které zde bylo použito, umožňovalo obsazení jednoho frekvenčního kanálu více uživateli pomocí dělení signálu do časových slotů. GSM síť využívají frekvenční pásma v okolí 900, 1800 a 1900 MHz.

Pod 2. generaci můžeme částečně zařadit také 2,5. generaci, která přinesla změnu v technologii transmise dat, kdy se začalo využívat přepínání paketů spolu s přepínáním okruhů. Tím vstoupila na svět systém GPRS (General Packet Radio Service) s maximální rychlostí dat 128 kbit/s a EDGE (Enhanced Data rates for Global Evolution) až 256 kbit/s. GPRS je tedy systém založen na GSM architektuře a doplňuje její stávající služby. EDGE byl zaveden v roce 2003 a byl později standardizován 3GPP jako součást GSM. Přinesl vylepšení ve formě dvojnásobného zvýšení kapacity přenosu dat.



Obr. 3.2: Topologie 2G

### **3.3 Síť 3. generace (3G UMTS)**

V roce 1998 byl vytvořen projekt 3GPP (3rd Generation Partnership Project), který měl za úkol pokračovat a koordinovat další standardizační práci. Vzhledem k nezávislosti služeb na technologii rádiového přístupu jsou zde odděleny segmenty přístupové sítě a páteřní přenosové sítě. Práce na standardu UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) začaly v roce 1990, kdy se k tomuto systému přistupovalo jen jako k rozšíření stávající 2G sítě. V roce 1999 byla vydána první verze UMTS s označením Release 99, která byla zpětně kompatibilní s GSM a přinesla nový typ rádiové přístupové sítě UTRAN (Universal Terrestrial Radio Access Network). UMTS kombinuje použití TDMA na obvyklých GSM pásmech s WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) pro sdílení přístupového kanálu na přidělených kmitočtech.

#### **3.3.1 Struktura UMTS sítě**

Předchozí vylepšení nemělo tak zásadní vliv na strukturu sítě jako UMTS. To se skládá z uživatelské stanice (UE - User Equipment), dále z obecné rádiové přístupové sítě UTRAN a jádra sítě (CN - Core network). Všechny části jsou od sebe odděleny rozhraním definovaným 3GPP, které zaručuje přímou komunikaci mezi entitami. CN se rozděluje na 2 logické domény podle metody připojování, a to CS (Circuit Switched), která je okruhově přepínaná a PS (Packet Switched), která je paketově přepínaná.

#### **3.3.2 Síť 3,5. generace (HSDPA a HSUPA)**

Byl vytvořen systém HSDPA (High Speed Downlink Packet Access), který dosahoval vyšších rychlostí než předchozí generace – až 15 Mbit/s pro downlink. Největší změnou bylo přesunutí některých funkcí z RNC (Radio Network Controller) do základnové stanice, což zefektivnilo přidělování rádiových kanálů. Nedlouho poté byla vydána nástavba tohoto protokolu High-Speed Uplink Packet Access (HSUPA).

### **3.4 Síť 4. generace - 4G (LTE a LTE-A)**

LTE (Long Term Evolution) je technologie určená pro vysokorychlostní internet v mobilních sítích. Oficiálně jde o technologii spadající do standardu 3G, ovšem LTE Advanced (LTE-A) již je plnohodnotné 4G. Byla definována v 8. a 9. vydání standardu 3GPP. V roce 2008 byla poprvé uvedena do provozu síť LTE, která je označována jako 3,9. generace. Dochází opět ke značnému zvýšení přenosové rychlosti, a to u

stahování i nahrávání (viz tab. 3.1). LTE se také snaží o snižování spotřeby energie, například pomocí zkvalitnění přístupu ke sledování a zpracování signalizačních zpráv. Teoretická rychlost stahování se pohybuje okolo 100 Mbit/s. LTE využívá ve směru k uživateli přístup OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) a ve směru od uživatele přístup SC-FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access).

V roce 2011 byl vydán standard LTE-A (Long Term Evolution Advanced) v 3GPP Release 10. LTE-A vychází z LTE a struktura těchto dvou technologií je podobná, ovšem LTE-A vyhovuje požadavkům IMT-Advanced, definovaných organizací ITU. LTE-A umožňuje koordinovat interferenci mezi buňkami, pružné využívání kmitočtového spektra, kognitivní rádio, vedení interference a potlačení, přiřazení šířky pásma pro asymetrické FDD, sdružování nosných frekvencí a paralelní přenos s využitím více antén díky systému MIMO (Multiple-Input, Multiple-Output). 3GPP Release 11 toto rozšiřuje na 2x2 MIMO. Také se plně využívá architektura EPS.

Tab. 3.1: Odhadovaná maximální rychlost mobilních sítí

Typ využívané technologie		Stahování dat	Odesílání dat
2G	EDGE	0,2 Mb/s	0,1 Mb/s
3G	HSPA	7,2 Mb/s	3,6 Mb/s
	HSPA+	42 Mb/s	5,76 Mb/s
LTE	LTE	150 Mb/s	50 Mb/s
	LTE Advanced	375 Mb/s	75 Mb/s

### 3.5 Technologie 5G v mobilních sítích

V únoru tohoto roku (2017) 3GPP vydalo standard R15 (Release 15), který standard 5G specifikuje. Tato technologie má za úkol pokrýt co nejvíce zařízení (V roce 2015 bylo připojeno 5 miliard mobilních zařízení, kolem roku 2020 se předpokládá 50 miliard), má maximální teoretickou rychlost 20 Gb/s, u metropolitních buněk až 100 Gb/s. Na uživatele tak vychází rychlost až 100 Mb/s. Latence se pohybuje v rozmezí 1-10 ms. Takto nízkých hodnot je dosaženo pomocí technologie Mobile Edge Computing. Výpočty provádí server umístěn v základnové stanici, která je co nejbližší ke koncovému zařízení. Edge Computing umožňuje také lepší optimalizaci řízení přístupové sítě a přidělování radiových prostředků jednotlivým zařízením.



## 3.6 Internet of Things (IoT)

Tyto sítě jsou převážně určeny pro datové přenosy s velikostmi zprávy do stovek Bytů. Navíc počet těchto zpráv bývá často omezen, což může být výhodou z hlediska výdrže baterie v koncovém zařízení.

### 3.6.1 SigFox

Jedná se o bezdrátovou síť, kde jsou posílány impulsy dat o velikosti 12 Bytů maximálně 144× za den. Tato síť je primárně určena pro různá čidla.

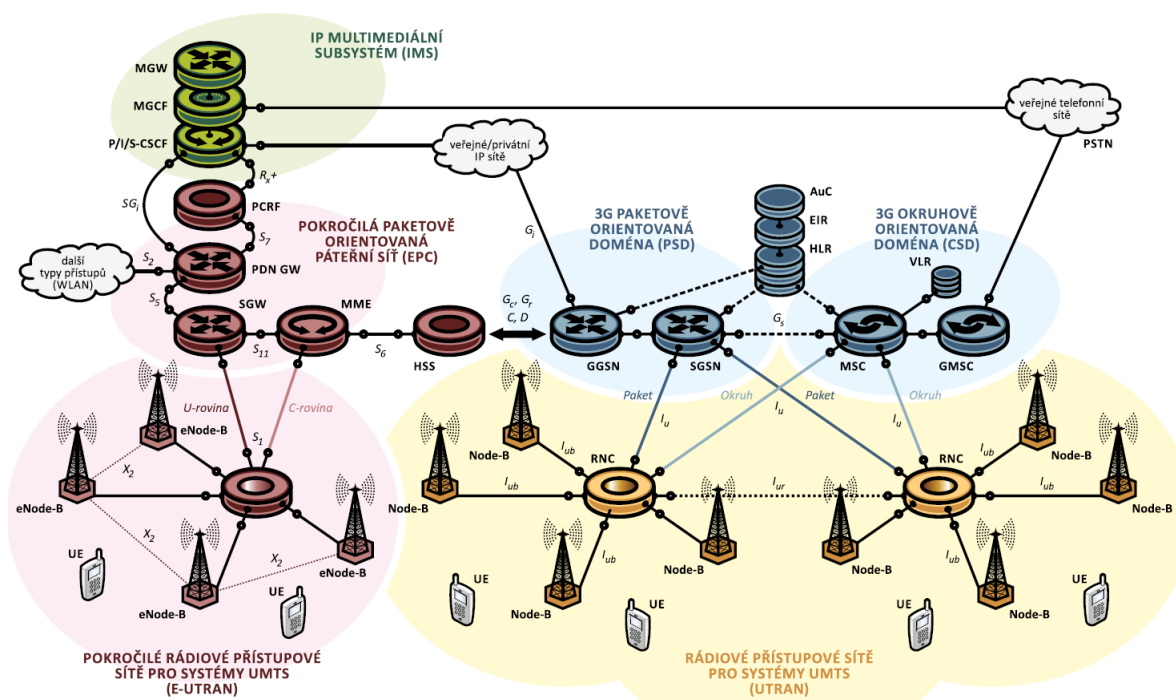
### 3.6.2 LoRa

LoRa (Long Range) je modulace patentovaná firmou Semtech. V této síti se denně mohou posílat tisíce zpráv o velikosti až 255 Bytů.

## 4 LTE

Následující schéma zobrazuje prvky v síťové infrastruktuře technologie LTE.

### 4.1 Topologie LTE



Obr. 4.1: Topologie sítě LTE [31]

Vývoj systému UMTS směrem k IMS znázorňují bloky EPC a E-UTRAN. Další bloky typické pro UMTS architekturu, UTRAN a části PS a CS, zprostředkovávají propojení k veřejným nebo privátním IP a telefonním sítím. Systém IMS je umístěn v horní části nad blokem páteřní sítě a poskytuje přístup k veřejným nebo privátním IP sítím a veřejným telefonním sítím prostřednictvím mediálních bran. Blok HSS, obsahující informace o uživateli, je zobrazen jako centrální uzel, který poskytuje služby pro všechny prvky páteřní sítě EPC a 3G architektury.

#### 4.1.1 E-UTRAN

Architektura UTRAN byla ze začátku v souladu s koncepty přístupové sítě GSM. Architektura E-UTRAN navazuje na hvězdicový model sítě GSM, kde je jeden řadič (RNC, Radio Network Controller), který může řídit několik stovek základnových

stanic (NodeB) přes rozhraní Iub. Toto rozhraní bylo také definováno Iur pro komunikaci mezi RNC, aby hovor probíhající v UMTS byl ukotven na úrovni RNC. První architektura části UTRAN zjednodušovala implementaci NodeB, ovšem systém RNC, který obsluhuje funkce řízení zdrojů a spojení i významnou část rádiových protokolů, byl složitější.

## **Uzly eNodeB**

Oproti UTRAN má E-UTRAN jednodušší strukturu. Skládá se z jednoho síťového prvku, kterým je eNodeB (evolved Node B). Řadič RNC, který byl ze sítí 2. generace jako BSC (Base Station Controller), již není součástí této architektury. eNodeB je přímo zapojen na páteřní síť pomocí rozhraní S1. Proto byly funkce RNC distribuovány mezi eNodeB nebo MME v páteřní síti, případně Serving Gateway.

## **Funkce eNodeB**

Architektura části E-UTRAN částečně směřuje k bezdrátovým sítím WLAN (Wireless LAN) a konceptu základnových stanic definovaných ve WiFi nebo WiMAX. eNodeB tedy obsahuje všechny vlastnosti vrstev L1 a L2 spojené s fyzickým rozhraním. Uzly eNodeB jsou pak přímo připojeny k síťové infrastruktuře. Zjednodušení síťové architektury (snížení počtu uzlů) usnadňuje provoz sítě a zvyšuje její výkon. eNodeB podporuje řadu běžných funkcí vztahených k procedurám fyzické vrstvy, které definují vysílání a příjem přes rádiové rozhraní:

- Modulace a de-modulace.
- Kanálové kódování a dekódování.

Protože v této síti neexistují další řadiče základních stanic v E-UTRAN, tato architektura zahrnuje:

- Řízení zdrojů rádiového kanálu (Radio Resource Control): alokace, úpravy a uvolňování zdrojů pro přenos rádiovým rozhraním mezi uživatelským terminálem a eNodeB.
- Práva radiové mobility (Radio Mobility Management): zpracování měření a rozhodnutí o handoveru.
- Plná podpora protokolů L2 na rádiovém rozhraní (Radio interface full L2 protocol): účelem 2. vrstvy OSI modelu je zajistit přenos dat mezi síťovými jednotkami a detekovat a případně opravit chyby, které mohou nastat při přenosu dat na fyzické vrstvě.

### 4.1.2 Evolved Packet Core (EPC)

Jádro sítě, EPC (Evolved Packet Core) je složeno z těchto entit:

- MME (Mobility Management Entity)
- HSS (Home Subscriber Server)
- Serving Gateway.
- PDN Gateway (Packet Data Network).
- PCRF (Policy and Charging Rules Function) Server.

#### Mobility Management Entity (MME)

Tato entita zajišťuje všechny funkce řídicí roviny týkající se účastníka a řízení relace. Z tohoto hlediska MME podporuje následující:

- Bezpečnostní postupy – autentizace, zahájení a domluva šifrovacích algoritmů a ochrana integrity koncového uživatele.
- Řízení relace ve směru terminál-sít – signalizační postupy k zahájení přenosu dat a vyjednání parametrů kvality služby.
- Management lokalizace terminálu v klidu – proces aktualizace sledovací oblasti používané v případě požadavku na příchozí spojení.

Entity MME a HSS jsou propojeny rozhraním S6.

#### Home Subscriber Server (HSS)

Jedná se o centrální databázi, která vznikla sloučením HLR (Home Location Register) a AuC (Authentication Center), dvou bloků již přítomných v sítích 2G a 3G. HSS má na starosti uložení a aktualizaci databáze informací o uživateli, obsahuje zejména:

- Identifikaci a očíslování uživatele – IMSI (International Mobile Subscriber Identity) a MSISDN (Mobile Subscriber ISDN Number) nebo mobilní telefonní číslo.
- Informace o Uživatelském profilu – stav přihlášeného účastníka a jeho požadavky na kvalitu služby, jako je například maximální povolená přenosová rychlost nebo povolené třídy provozu.

HSS také integruje ověřovací centrum (AUC), které generuje zabezpečovací klíče a vektory pro ověřování. Tyto bezpečnostní informace jsou dále poskytovány části HLR a následně sděleny jiným subjektům v síti. Informace o zabezpečení se používají pro vzájemné ověřování sítě a terminálu nebo pro šifrování radiové části a ochranu integrity.

## **Serving GW**

Serving GW (Obslužný uzel podpory) je koncovým bodem datového provozu k E-UTRAN. Když se koncové zařízení (smartphone) pohybuje v E-UTRAN přes uzly eNodeB, zodpovídá Serving GW za mobilitu. To znamená, že pakety jsou směrovány přes tento bod při pohybu v rámci E-UTRAN i při spojení s dalšími technologiemi 3GPP, například GSM, 2G, 3G a UMTS.

## **Packet Data Network Gateway (PDN GW)**

Jedná se o koncový bod datového provozu směrem k jiným sítím paketových dat. PDN GW podporuje funkci vynucování politik, na které se vztahují pravidla stanovená provozovatelem, filtrování paketů a pokročilé metody účtování.

## **Server PCRF (Policy and Charging Rules Function)**

Server PCRF je zodpovědný za řízení rozhodovacího procesu při přidělování QoS. PCRF poskytuje přidělení identifikátoru QoS třídy, který rozhoduje, jak bude s určitým datovým tokem zacházeno v PCEF (Policy Control Enforcement Function) a zajišťuje, že je to v souladu s profilem uživatele. Server PCRF kombinuje funkce dvou uzlů ze struktury UMTS, a to PDF (Policy Decision Function) a CRF (Charging Rules Function)

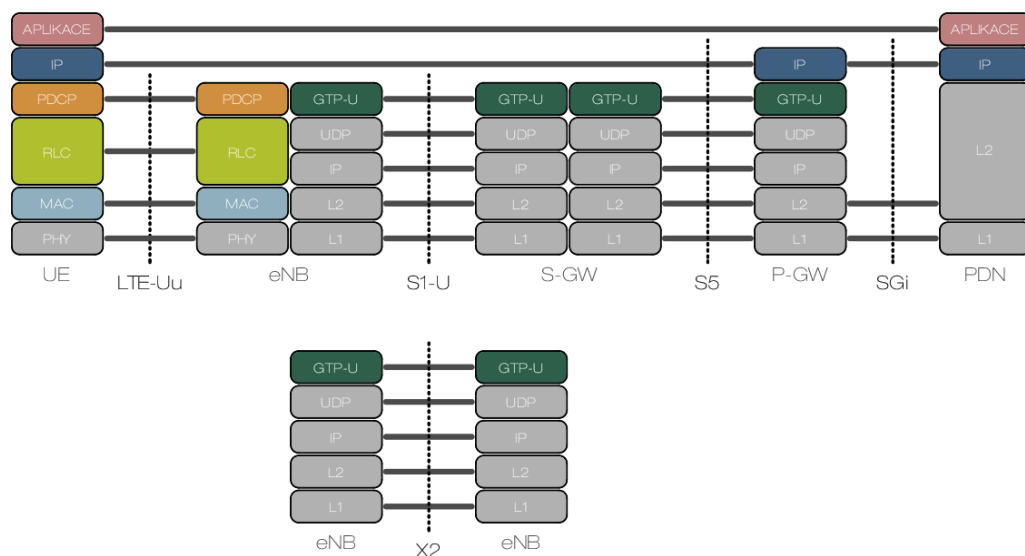
Entita PDF je prvek v síti rozhodující o přidělení typu médií. Ve fázi sestavování relace podle postupů IMS jsou mezi terminálem a P-CSCF vyměňovány signální zprávy SIP obsahující požadavky na typ média. PDF přijímá tyto požadavky z P-CSCF a činí rozhodnutí založená na pravidlech provozovatele sítě, jako je povolení nebo zamítnutí žádosti o typu médií.

CRF zajišťuje provozovatelem stanovená pravidla účtování a aplikuje je na každý datový tok. Pravidla účtování vybírá na základě informací poskytnutých od P-CSCF (identifikátor aplikace, typ toku, přenosová rychlost dat, ad.)

# **4.2 Protokolová architektura LTE**

## **4.2.1 Uživatelské protokoly LTE**

- PDCP (Packet Data Convergence Protocol) zajišťuje efektivní transport IP paketů přes rádiový spoj. Provádí kompresi hlaviček, zabezpečení (šifrování a ochranu integrity) a retransmisi paketů při handoveru.
- RLC (Radio Link Control) vytváří RLC PDU (Protocol Data Unit) a předává ji do vrstvy MAC. Protokol RLC provádí segmentaci nebo zřetězení PDCP

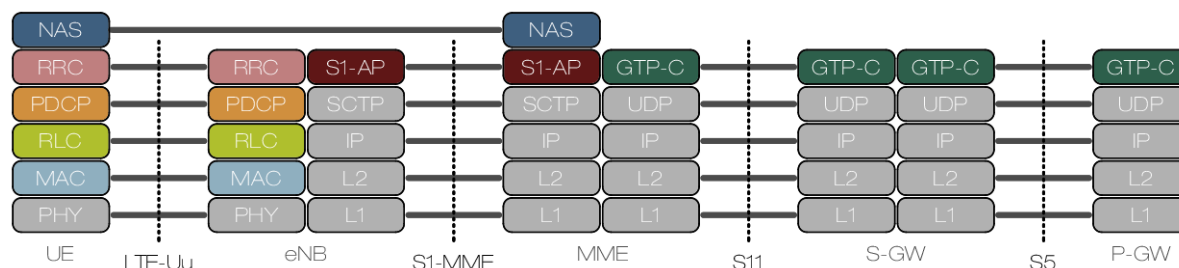


Obr. 4.2: Uživatelská rovina LTE

PDU během tvorby RLC PDU. Na přijímací straně provádí protokol RLC zpětné sestavení RLC PDU a rekonstruuje PDCP PDU. RLC má tři provozní režimy (transparentní, potvrzovaný a nepotvrzovaný), které nabízí různé úrovně spolehlivosti. Provádí také přeuspořádání a retransmisi paketů (RLC PDU).

- MAC leží mezi vrstvami RLC a PHY (fyzickou vrstvou sítě). K vrstvě RLC je připojena prostřednictvím logických kanálů a k vrstvě PHY prostřednictvím transportních kanálů. Díky tomu protokol MAC podporuje multiplexing a demultiplexing mezi logickými a přenosovými kanály. Vyšší vrstvy využívají různé logické kanály pro metriky QoS. Protokol MAC podporuje QoS pomocí plánování a prioritizace dat z logických kanálů. eNB plánovač zajišťuje dynamické přidělování rádiových zdrojů koncovým uzlům UE (User Equipment - zařízení uživatele), provádí řízení QoS a zajišťuje, aby každá nosná frekvence měla přiděleny vyjednané parametry QoS.
- PHY je fyzická vrstva a zabezpečuje základní funkce bitového přenosu bezdrátovým rozhraním. V příchozím směru (downlink) používá OFDMA a v odchozím směru (uplink) SC-FDMA. Fyzické kanály jsou dynamicky mapovány podle dostupných zdrojů. Směrem k vyšším vrstvám nabízí fyzická vrstva své funkce pro transmissi dat přes přenosové kanály. Stejně jako v UMTS je transportní kanál orientovaný na blokový přenos služeb s určitými vlastnostmi, čítající přenosovou rychlost, zpoždění, riziko kolize a spolehlivost.
- GTP-U je používán pro předávání uživatelských IP paketů přes rozhraní S1-U, S5 a X2.

## 4.2.2 Řídící protokoly LTE



Obr. 4.3: Řídící rovina LTE

- NAS (Non-Access Stratum) provádí řízení mobility a nosných radiových služeb.
- RRC (Radio Resource Control) zajišťuje přenos signalizace NAS. Provádí také funkce potřebné pro efektivní řízení radiových zdrojů jako Broadcast (vysílání) systémové informace, zahájení, rekonfiguraci nebo ukončení spojení RRC a radiových služeb.
- X2AP (X2 Application Protocol) zajišťuje mobilitu UE a funkce SON v rámci E-UTRAN. Pro zajištění mobility UE nabízí funkce jako přesměrování uživatelských dat, přenos stavu SN a předání kontextu UE. Pro zajištění SON funkcí nabízí informace o stavu eNBs, informace o provozním zatížení a informace o aktualizaci konfiguraci eNB. Také koordinuje parametry mobility.
- S1AP (S1 Application Protocol) zajišťuje funkce řízení S1 rozhraní, řízení E-RAB, transport NAS signalizace a management kontextu UE. Zprostředkovává prvotní kontext UE směrem k eNB pro potřeby nastavení E-RAB a řídí následné změny nebo jeho uvolnění.
- GTP-C (GPRS Tunneling protocol) zajišťuje výměnu řídicích informací pro vytváření, úpravu a ukončení GTP tunelů. V případě handoveru v LTE vytváří tunely pro předávaná data.

## 4.3 Fyzické a logické kanály v LTE

E-UTRAN je schopna přenášet vysokorychlostní data s nízkým zpožděním efektivně, nicméně ne všechny informační toky vyžadují stejnou ochranu proti chybám při přenosu nebo zajištění kvality služby. Obecně lze říci, že v případě radiové mobility je rozhodující, že signalizační zprávy E-UTRAN jsou přenášeny nejvyšší dosažitelnou rychlostí, ideálně se současným použitím proti-chybových schémat. Ovšem aplikace

vytvářející toky hovorových či jiných dat akceptují přiměřenou ztrátu rámců v rádiovém přenosu. Specifikace E-UTRAN představuje několik typů kanálů, které jsou flexibilní a umožňují různé režimy pro přenos dat:

- logické kanály (Obsah datového toku)
- transportní kanály (Způsob přenosu dat)
- fyzické kanály (Datové médium)

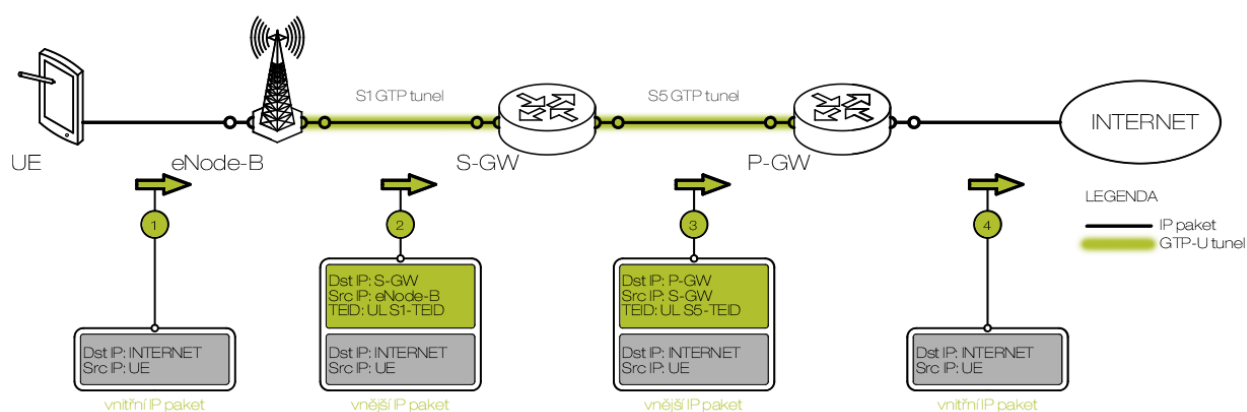
Existují pouze dva typy logických kanálů - řídicí kanály (pro přenos informací v řídicí rovině) a provozní kanály (pro přenos informace v uživatelské rovině). Každý z těchto kanálů odpovídá informačnímu toku určitého typu.

Transportní kanály popisují, jak jsou data přenášena přes rádiové rozhraní, například způsob ochrany dat proti chybám při přenosu, typu kanálového kódování, zabezpečení CRC, typu použitého prokládání nebo velikosti datových paketů odesílaných přes rádiové rozhraní. Transportní kanály jsou rozděleny do dvou kategorií, a to na transportní kanály pro downlink a kanály pro uplink.

Fyzické kanály jsou realizací transportního kanálu rádiovým rozhraním. Jsou rozpoznávány pouze na fyzické vrstvě E-UTRAN a jejich struktura je závislá na fyzikálních vlastnostech rozhraní OFDM.

## 4.4 Přístup k internetu v LTE

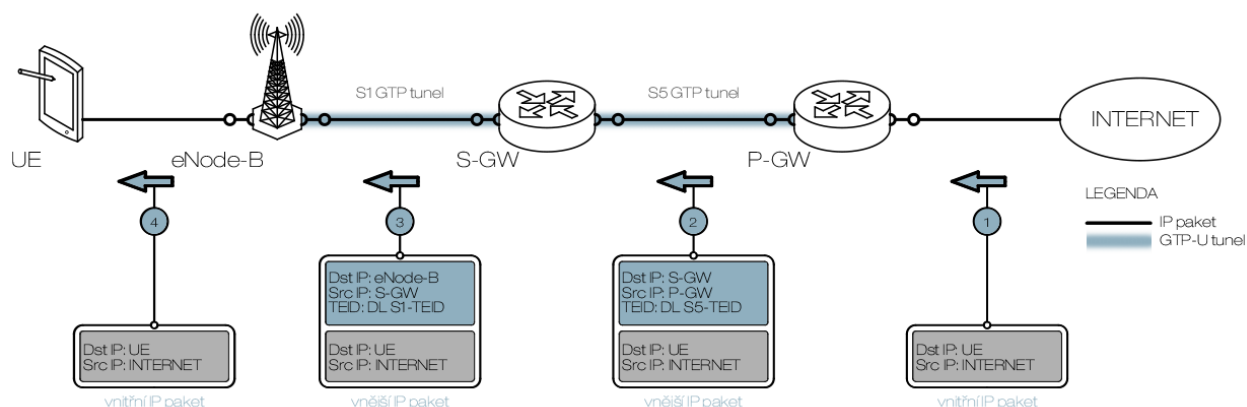
Následující obrázky ukazují postup toku dat při komunikaci zařízení s internetem v uživatelské rovině referenčního modelu architektury sítě LTE.



Obr. 4.4: Od UE do Internetu

IP pakety jsou předávány přes GTP tunel do rozhraní S1-U a S5. Uživatel připojený k síti LTE má pro každou službu EPS sestaven vlastní GTP tunel. Na každém rozhraní S1-U a S5 je vytvořeno více služeb EPS. Za účelem identifikace těchto služeb





Obr. 4.5: Z Internetu do UE

je koncovým bodům (UL a DL) jednoznačně přiřazen identifikátor TEID (Tunnel Endpoint Identifier). Při identifikaci GTP tunelu jsou obvykle použity TEID, IP adresa a číslo portu. Přijímající strana GTP tunelu místně přiřadí hodnotu TEID, kterou má vysílající strana použít. Hodnoty TEID jsou pak vyměněny mezi koncovými body tunelu pomocí protokolů řídicí roviny.

Když je na rozhraní S1-U sestaven GTP tunel, S-GW přiřazuje TEID (UL S1-TEID na obrázku 4.4 pro odchozí provoz a eNB přiřazuje TEID (DL S1-TEID na obrázku 4.5) pro příchozí provoz. Jeho hodnoty z S1 GTP tunelu jsou vyměňovány mezi eNB a S-GW pomocí zpráv S1AP a GTP-C. Podobně když je na rozhraní S5 sestaven GTP tunel, P-GW přiřazuje tento identifikátor pro odchozí provoz (UL S5-TEID na obrázku 4.4) a S-GW jej přiřazuje pro příchozí provoz (DL S5-TEID na obrázku 4.5). Hodnoty TEID z S5 GTP tunelu jsou vyměňovány mezi S-GW a P-GW za použití protokolu GTP-C. IP paket prostřednictvím GTP tunelu je doručen na rozhraní S1-U a S5, entity eNB, S-GW a P-GW jej zapouzdří s hodnotou TEID přidělenou přijímající stranou a toto přepošlou. V odchozím směru S-GW sestaví mapování mezi tunelem S1 GTP (UL S1-TEID) a tunelem S5 GTP (UL S5-TEID) za účelem předání uživatelského IP paketu z tunelu S1 GTP do tunelu S5 GTP.

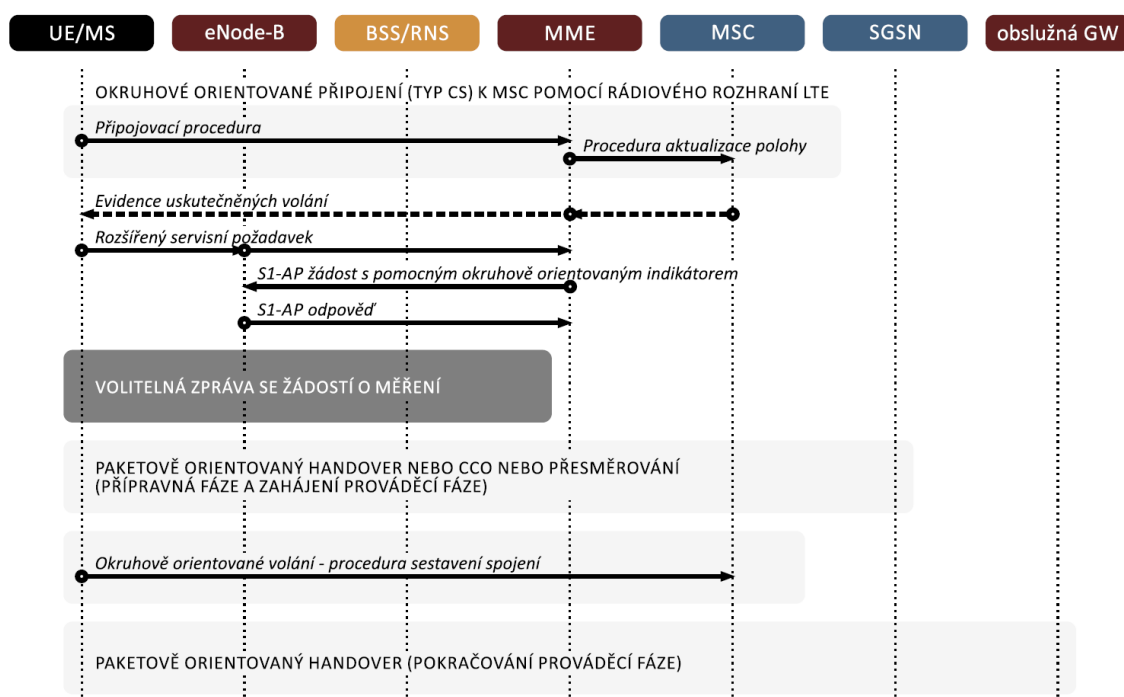
## 4.5 Přenos hovoru v LTE

Hovory v sítích GSM a UMTS jsou realizovány pomocí technologie přepojování okruhů. Chybějící technologie přepojování okruhů v LTE (Standard LTE podporuje pouze technologii přepojování paketů) může způsobovat problémy při přenosu hovoru. Z tohoto důvodu existují tři různá řešení:

- VoLTE (Voice over LTE)
- CSFB (Circuit-switched fallback)
- SVLTE (Simultaneous voice and LTE)

### 4.5.1 CSFB

Model CSFB musí být použit v případě, že služby IMS nejsou v síti implementovány nebo LTE poskytuje pouze datové služby. Má-li být hovor zahájen, bude realizován v doméně s přepojováním okruhů, tedy v původní technologii (nejčastěji 3G). Při použití tohoto řešení operátoři pouze upgradují MSC místo nasazení celého IMS.



Obr. 4.6: Diagram toku zpráv pro CSFB (LTE do 3G (UMTS)) [31]

Obrázek ukazuje tok zpráv při CSFB pro sestavení volání z LTE do UMTS. Je též znázorněn paging od MSC přes rozhraní SGs a MME v případě hovorů termínovaných na UE. Zpráva Extended Service Request zasláná z UE do MME spouští handover nebo přesměrování do cílové technologie rádiového přístupu.

### 4.5.2 Simultaneous voice and LTE (SVLTE)

Terminál pracuje současně v LTE a v CS režimu (režim s přepojováním okruhů). LTE poskytuje datové služby, zatímco režim CS zajišťuje hovorové služby. Jedná se o řešení, které nemá velké požadavky na síť a ani nevyžaduje zavádění IMS služeb. Nevýhodou může být vysoká pořizovací cena telefonu a nízká výdrž jeho baterie. Dalším modelem jak v síti LTE poskytovat hovorové služby je použití OTT (over-the-top) s využitím aplikací, jako je například Skype. Tento model však není iniciován operátory.

## 5 HANDOVER (PŘEPNUTÍ)

### 5.1 Handover v LTE

Stejně jako ostatní mobilní sítě má i LTE problémy při předání a opakovaných výběrech. U LTE vznikají komplikace kvůli tomu, že síť se musí vypořádat s Intra-LTE handoverem, jakož i s předáním mezi LTE a UTRAN, LTE a GERAN a jinými mobilními sítěmi.

Základní postupy a cíle při handoverech:

- QoS by při handoveru neměla poklesnout.
- Předání by nemělo vyčerpávat baterii zařízení.
- Zařízení by mělo pokračovat ve službách před a po předání.
- Předání mezi 2G / 3G / CDMA / LTE technologií musí být bezešvé.

Běžně se používají dva typy předání v mobilních sítích:

- Sítí kontrolovaný: v tomto případě síť rozhoduje o předání.
- UE kontrolovaný (vynucený): Zařízení rozhoduje o předání a informuje o tom síť. Ovšem síť přijme požadavek a vydá konečné rozhodnutí na základě rádiových zdrojů, které jsou k dispozici v cílové buňce.

V síti LTE se používá hybridní přístup. UE vysílá informace o měření do sítě a na základě těchto měření se síť dotazuje UE o přechodu do cílové buňky.

Druhy předání v LTE sítích:

- Intra-LTE: Předání mezi buňkami, které jsou součástí stejné LTE sítě.
- Inter-LTE: Předání vůči jiným LTE uzlům v síti. (Inter-MME a Inter-SGW).
- Inter-RAT: Předání mezi různými rádiovými technologiemi. Například předání od LTE na WCDMA.

### 5.2 Intra-LTE handover

#### 5.2.1 Intra-MME | SGW: Předání pomocí rozhraní X2

X2 je rozhraní mezi dvěma uzly eNodeB. Je-li toto rozhraní přítomné, předání je dokončeno bez EPC. Uvolnění prostředků na zdrojovém eNodeB je vyvoláno cílovým eNodeB.

#### 5.2.2 Intra-MME | SGW: Předání pomocí S1 rozhraní

V případě, že X2 rozhraní není k dispozici, a zdrojový i cílový eNodeB jsou součástí téhož MME / SGW, pak se předání provede přes S1 rozhraní. S-eNB iniciuje předání

zasláním požadované zprávy přes referenční bod S1-MME. EPC nemění rozhodnutí přijatá S-eNB.

## **5.3 Inter-LTE handover**

### **5.3.1 Inter-MME handover**

V Inter-MME handoveru se dva MME (zdrojové a cílové MME) podílejí na předání mezi dvěma uzly eNodeB. K Inter-MME předání dochází, když se UE pohybuje mezi dvěma různými MMEs, ale je připojen ke stejnému SGW.

### **5.3.2 Inter-MME | SGW handover**

Jedná se o podobný princip jako Inter-MME. Rozdílem je, že UE přechází od jednoho MME/SGW k jinému MME/SGW. Zdrojový eNodeB je součástí jedné MME/SGW a cílový eNodeB je v jiném MME/SGW.

## **5.4 Inter-RAT handover**

Při předávání mezi eUTRAN do UTRAN (LTE do WCDMA), je zdrojový eNodeB připojen na zdrojový MME a SGW. Cílový RNC a je spojen s cílovým SGSN a Target SGW. První požadované zdroje jsou vyhrazeny v UTRAN systému a poté je předání provedeno.

## **5.5 Soft and softer Handover v UMTS**

Handover je důležitou součástí každé buňky komunikačního systému a používá se pro zajištění mobility v buněčných architekturách. V UMTS systémech byly zavedeny různé typy předání a další techniky pro vyrovnanost sítě (např. kontrola zátěže, poskytování pokrytí a QoS). Předání si klade za cíl zajistit kontinuitu mobilních služeb pro uživatele pohybující se přes hranice buněk. Pro uživatele, který má probíhající komunikaci přes více buněk, je výhodnější použít rádiové zdroje v nové buňce (cílová buňka).

Schopnost celulární sítě provádět efektivní předávání je důležitá také pro další služby, jako jsou aplikace v reálném čase nebo streamování médií.

### 5.5.1 Softer Handover

Měkčí předání je situace, kdy jedna základnová stanice (BS) přijímá dva uživatelské signály ze dvou sousedních sektorů. S těmito signály se zachází stejně jako u vícecestných propagací. Tento přístup je použit z důvodu možného rušení ať už přírodními či umělými překážkami. Ve směru k uživateli BS používá různé šifrování a kódy k oddělení jednotlivých sektorů, které obsluhují provoz, takže je nutné pro jednotlivé sektory přijímače v mobilním terminálu požádat příslušný kód dešifrování na signálech obdržených od různých sektorů před jejich spojením dohromady.

### 5.5.2 Soft Handover

V případě měkkého předání je UE v překrývajících se oblastech buněk ze dvou sektorů, které patří do různých BS. Ve směru k uživateli jsou přijaté signály od dvou různých BS kombinované pomocí MRC Rake. Ve směru od uživatele přijaté signály již nemohou být kombinovány v BS, ale jsou směrovány do RNC. Spojení signálů je podle RNC, kde jsou dva signály porovnávány na základě jednotlivých snímků a po každém opakování je vybrán nejlepší kandidát. Každých 10, 20, 40 nebo 80 ms. Protože algoritmus řízení výkonu vnější smyčky měří SNR přijatých vzestupných signálů rychlostí mezi 10 a 100 Hz, používá se tato informace pro výběr rámce s nejlepší kvalitou během měkkého předání.

Postup při měkkém předání se skládá z řady jednotlivých funkcí: Měření, filtrace měření, hlášení výsledků měření, soft handover algoritmus a samotná realizace předání.

### 5.5.3 Soft Handover Algorithm

Soft handover v praxi je složitý postup. Jeho princip je popsán na následujícím příkladu.

#### Aktivní nastavení

Informace pro uživatele je odeslána všem buňkám v aktivní skupině. V FDD jsou buňky v aktivní sadě a jsou zapojeny do měkkého předání. V TDD je aktivní množina obsahující vždy jen jednu buňku. UE musí brát v úvahu pouze aktivní sady buněk obsažených v proměnné CELL INFO LIST pro měření.

#### Nastavení Monitorování

Sem patří buňky, které nejsou obsaženy v aktivní sadě, ale jsou zahrnuty do CELL INFO LIST.

#### Detekované nastavení

Buňky detekované UE, které nejsou ani v CELL INFO LIST ani v aktivní sadě patří do detekovaného nastavení. Hlášení o měření detekovaného nastavení je použité pouze pro frekvenční měření provedená podle UE v CELL DCH stavu.

#### Doplňěk rádiového spojení (1A Event)

Událost se spustí, když primární CPICH (Common pilot channel) vstupuje do podávání zpráv. Buňka je dostatečně silná, aby vstoupila do aktivního nastavení.

#### Odstranění rádiového spojení (1B Event)

Událost se spustí, když primární CPICH opouští podávání zpráv. Buňky v aktivním nastavení zeslábnou a musí být odstraněny z aktivního nastavení.

#### Kombinovaný doplněk a odstranění rádiového spojení (1C Event)

Událost je spuštěna, pokud neexistuje aktivní primární CPICH. Tím dojde k jeho vytvoření. Je-li tato událost spuštěna primární CPICH se odstraní z aktivního nastavení a nová silnější buňka se přidá do aktivního nastavení.

## 6 VOIP

### 6.1 Charakteristika VoIP

VoIP (Voice over Internet Protocol) je technologie, která umožňuje přenos digitalizovaného hlasu v paketech protokolů UDP a TCP/IP prostřednictvím síťových architektur, využívá se zejména pro telefonování. Podmínkou pro spolehlivé VoIP telefonní spojení je zajištění dostatečné kvality služby (QoS). Základní funkcí VoIP je pakelizace audio streamu (toku), aby jej bylo možno přenášet přes síť založené na IP protokolu. Na kvalitu přenosu jsou kladeny značné nároky: Nejenže signál (hlas) musí dorazit ve stejném tvaru, v jakém byl odeslán, ale je třeba, aby dorazil dříve, než po 150 ms, což je horní hranice toho, aby nám zvuk nepřipadal trhaný. Pokud jsou tyto pakety ztraceny nebo zpožděny, dochází k degradaci kvality hovoru a může dojít k jeho výpadku.

#### 6.1.1 Protokoly používané ve VoIP

Pro přenos hlasu se používá na třetí vrstvě modelu OSI protokol IP a na čtvrté vrstvě protokol UDP. V těle jednotlivých UDP datagramů v protokolu RTP (Real Time Protocol) se přenáší části (většinou 20 nebo 30 ms podle použitého kodeku) hlasových dat, která jsou zakódována pro dosažení úspory při přenosu. Kódovací a dekódovací algoritmy (souhrnně kodeky) jsou standardizovány a mají různá označení, například kodek G.729 nebo kodek G.711. Pro VoIP protokol byly vyvinuty speciální kodeky SPEEX a iLBC. Absence prefixu "G" značí, že tyto kodeky nejsou standardizovány organizací ITU, která se touto problematikou v oblasti IT zabývá. Kromě těchto UDP datagramů, které nesou v RTP zabalené úseky vlastního hovoru, zahrnuje VoIP přenos ještě další pakety, jm. ICMP a též datagramy TCP a UDP. Ty řídí přenos, nesou telefonní signál a ověřují dostupnost komunikujících zařízení.

VoIP protokol není jediný, má řadu variant lišících se podle standardu použitého pro spojení. Nejběžnější je H.323, který je starší a je postupně nahrazován protokolem SIP. Dále se používají speciální protokoly jako například Skinny nebo HFA a protokol softwarových ústředěn Asterisk. Lze říci, že mají podobný princip přenosu dat hovoru (proud krátkých úseků nesených v RTP), ale liší se ve službách a signalizaci. Protokol SIP má výhodu v tom, že prochází bez větších potíží přes místo, kde v síti probíhá překlad adres NAT. Existuje totiž několik způsobů, jak dosáhnout bezproblémového průchodu komunikace typu SIP.



## 6.1.2 Kodeky používané ve VoIP

Kodeky jsou různé matematické modely užívané k digitálnímu kódování a kompresi analogové zvukové informace. Podobně jako vidíme optické iluze, tak i algoritmy pro kompresi zvuku částečně využívají to, že si domýšlíme a doplňujeme nekompletní informace. Účelem těchto kódovacích algoritmů je najít optimální řešení mezi výkonem a kvalitou přenášeného hovoru.

Codec & Bit Rate (Kbps)	Codec Sample Size (Bytes)	Codec Sample Interval (ms)	Mean Opinion Score (MOS)	Voice Payload Size (Bytes)	Voice Payload Size (ms)	Packets Per Second (PPS)	Bandwidth MP or FRF.12 (Kbps)	Bandwidth w/cRTP MP or FRF.12 (Kbps)	Bandwidth Ethernet (Kbps)
G.711 (64 Kbps)	80 Bytes	10 ms	4.1	160 Bytes	20 ms	50	82.8 Kbps	67.6 Kbps	87.2 Kbps
G.729 (8 Kbps)	10 Bytes	10 ms	3.92	20 Bytes	20 ms	50	26.8 Kbps	11.6 Kbps	31.2 Kbps
G.723.1 (6.3 Kbps)	24 Bytes	30 ms	3.9	24 Bytes	30 ms	33.3	18.9 Kbps	8.8 Kbps	21.9 Kbps
G.723.1 (5.3 Kbps)	20 Bytes	30 ms	3.8	20 Bytes	30 ms	33.3	17.9 Kbps	7.7 Kbps	20.8 Kbps
G.726 (32 Kbps)	20 Bytes	5 ms	3.85	80 Bytes	20 ms	50	50.8 Kbps	35.6 Kbps	55.2 Kbps
G.726 (24 Kbps)	15 Bytes	5 ms			20 ms	50	42.8 Kbps	27.6 Kbps	47.2 Kbps
G.728 (16 Kbps)	10 Bytes	5 ms	3.61	60 Bytes	30 ms	33.3	28.5 Kbps	18.4 Kbps	31.5 Kbps
G722_64k (64 Kbps)	80 Bytes	10 ms	4.13	160 Bytes	20 ms	50	82.8 Kbps	67.6 Kbps	87.2 Kbps

Obr. 6.1: Používané kodeky a jejich specifikace [32]

### 6.1.3 Protokol SIP

SIP je textový protokol zajišťující inicializaci, modifikaci a ukončení spojení. Má uplatnění v IP telefonii, konferencích, Instant Messagingu. Obvykle využívá UDP na portu 5060, ovšem funguje i na TCP 5060. V současnosti se používá druhá verze tohoto protokolu popsaná v RFC 3261.

Tento protokol spolupracuje s dalšími protokoly - Přenos hovoru je uskutečňován pomocí protokolu RTP, detaily o vlastnostech přenosu popisuje protokol SDP, který je přenášen v těle SIP paketů.

Starší standard pro signalizaci ve VoIP H.323 byl vyvinut organizací ITU-T a je oproti SIPu výrazně složitější. Protokol SIP proto vznikl jako vylepšení tohoto standardu, kdy klade důraz na jednoduchost a je založený na prověřených principech. Proto vychází z protokolu HTTP a je mu podobný. Také využívá podobných položek jako SMTP protokol pro posílání e-mailů.

#### **Základní funkce:**

- **Poloha uživatele - nalezení spojení s koncovou stanicí**
- **Schopnosti uživatele - zjištění, jaké jsou schopnosti zařízení, například typ kodeku**
- **Dostupnost uživatele - zjištění zda je účastník schopen relaci navázat**
- **Nastavení relace a navázání spojení - protokol SDP, který popisuje navázané spojení a odkazuje na protokol RTP**
- **Změna relací a řízení spojení - změny vlastností v průběhu relace a věci spojené s jejím ukončením**

### 6.1.4 Síťové prvky SIP

**User Agent (UA)** je klient nebo server (telefon, brána). **User Agent Client (UAC)** je logická funkce, která generuje žádosti SIP a přijímá odpovědi SIP. Jedná se např. o SIP telefon inicializující hovor nebo SIP Proxy přeposílající žádosti k jinému UAC. **User Agent Server (UAS)** je logická funkce, která přijímá žádosti SIP a posílá odpovědi SIP.

**Proxy server** je technologie mezi volajícími v sítích SIP zodpovědná za přeposílání žádostí nebo odpovědí. Primární funkcí proxy serveru v SIP sítích je tedy směrování, ale také může zajišťovat autentizaci a autorizaci uživatelů.

**Redirect server** je speciální typ UAS generující odpovědi třídy 3xx, které v sobě nesou adresu volaného. Jeho hlavním úkolem je tedy odeslat zpět UAC adresu, na které se volaný nachází.

**Registar server** přijímá pouze žádosti o registraci SIP REGISTER od UAC a aktualizuje podle nich lokalizační databázi koncových UA, které jsou v rámci domény spravovány. Registrar udržuje v databázi SIP Ta není součástí SIP protokolu a obsahuje tabulky s AOR (veřejná identita uživatele) s kontaktními adresami uživatelů.

**B2BUA** generuje SIP žádosti jako UAS a SIP odpovědi jako UAC. Hovor mezi dvěma účastníky SIP řízený B2BUA je tvořen dvěma dialogy.

### 6.1.5 Adresace v SIP

Identifikace pomocí SIP URI (Uniform Resource Identifier. Port je volitelný, ovšem standardně je 5060.

- **sip:user@domain:port** (**sip:xguzna00@vutbr.cz**)
- **sip:user@host:port** (**sip:774852134@proxy.vutbr.cz**)

RFC 3261 definuje zabezpečený SIP. Port je volitelný – standardně 5061.

- **sips:user@domain:port** (**sips:xguzna00@vutbr.cz**)
- **sips:user@host:port** (**sips:774852134@proxy.vutbr.cz**)

### 6.1.6 Struktura zprávy SIP

Informace v hlavičce SIP protokolu jsou v následujícím pořadí:

- **Inicializační řádek relace**
- **Jeden nebo více řádků hlavičky**
- **Prázdný řádek (indikuje konec hlavičky)**
- **Volitelné tělo zprávy**

### 6.1.7 Zprávy v SIP

Zprávy typu **Žádost** jsou vysílány klientem k serveru.

- **INVITE** - Indikuje, že uživatel nebo služba je pozvána k účasti v relaci. Také bývá použita k modifikaci charakteristiky probíhající relace. Tělo žádosti s metodou INVITE může nést popis relace kódovaný pomocí SDP.
- **ACK** - Potvrzuje, že UAC přijal finální odpověď na žádost INVITE. Používá se pouze s metodou INVITE. V případě, že žádost INVITE neobsahovala popis relace protokolem SDP, může jí nést ACK.
- **BYE** - Posílá UA v případě požadavku o ukončení probíhající relace.
- **CANCEL** - Umožňuje UAC a síťovým serverům stornovat žádost, jako je například INVITE.
- **OPTIONS** - Je využívána UA pro zjištění kapacity UAS.
- **REGISTER** - Využívána klientem pro registraci současné polohy odpovídající AOR SIP serveru.

Další metody jsou definovány v samostatných RFC: SUBSCRIBE, NOTIFY, REFER, PUBLISH a UPDATE.

Zprávy typu **Odpověď** posílá server klientovi a indikuje stav žádosti. Jsou rozděleny do následujících tříd.

Tab. 6.1: Tabulka zpráv typu Odpověď

Třída	Popis
1xx	Dočasná nebo informativní – žádost je zpracovávána ale není kompletní
2xx	Úspěch – žádost byla kompletně zpracována
3xx	Přesměrování – Žádost by měla být ověřena v jiné lokalitě
4xx	Chyba na straně klienta – žádost není provedena
5xx	Chyba na straně serveru – žádost není provedena
6xx	Globální chyba – žádost je chybná a měla by být znovu vyslaná

## 7 KVALITA SLUŽEB (QoS)

QoS (Quality of Service) je používána pro rezervaci a řízení datových toků v telekomunikačních a počítačových sítích, které používají přepojování paketů. Protokoly pro QoS se snaží zajistit vyhrazení a dělení dostupné přenosové kapacity, aby nedocházelo ke snížení kvality síťových služeb z důvodu zahlcení sítě.

### 7.1 QoS v LTE

V UE může být spuštěno více aplikací souběžně, přičemž každá z nich má různé požadavky na QoS. VoIP má přísnější požadavky na QoS při zpoždění než při stahování, také přenosy dat vyžadují mnohem nižší ztrátovost paketů. Za účelem podpory více požadavků na QoS v EPS jsou nastaveni různí nositelé služby, z nichž každý je spojen s QoS.

Na základě typu QoS, které poskytují, mohou být nositelé služby rozděleni do dvou kategorií:

- **GBR** (Guaranteed BitRate) je použita pro aplikace jako je hovor. Má přiřazenu hodnotu GBR, pro kterou jsou trvale přiděleny specifické přenosové prostředky (např. funkce pro řízení přístupu do eNodeB). Přenosové rychlosti vyšší než GBR mohou být pro nositele GBR povoleny, pokud jsou k dispozici zdroje. V takových případech parametr maximální přenosové rychlosti MBR (Maximum BitRate) stanoví horní hranici přenosové rychlosti.
- **Non-GBR** Non-GBR nezaručuje žádnou konkrétní přenosovou rychlost. Ty mohou být použity pro aplikace, jako je prohlížení webu nebo FTP přenos. Těmto nositelům služby nejsou trvale přiděleny žádné přenosové parametry.

V přístupové síti je eNodeB odpovědný za zajištění plnění třídy QoS pro nositele služby. Každý nositel služby má přiřazen identifikátor třídy QCI (Quality Class Identifier) a prioritu ARP (Allocation and Retention Priority). QCI je charakterizován prioritou, množstvím zpožděných paketů a přijatelnou ztrátovostí paketů. Značka QCI pro nositele služby určuje způsob, jakým je zpracována v eNodeB. Díky standardizaci QCI je zajištěno, že provozovatel LTE může očekávat stejné zacházení s provozem v síti bez ohledu na výrobce eNodeB zařízení. Soubor standardizovaných QCIs s charakteristikami, z nichž se volí PCRF v EPS, jsou uvedeny v tabulce níže.

Způsob, jakým plánovač v MAC zpracuje pakety odeslané přes nositele služby je dán konfigurací režimu RLC, který je určen prioritou, zpožděním a ztrátovostí paketů na značce QCI.

QCI	Typ zdroje	Priorita	Zpoždění paketů (ms)	Ztrátovost paketů	Příklad služby
1	GBR	2	100	10–2	Konverzační videohovory
2	GBR	4	150	10–3	Konverzační videohovory (živé vysílání)
3	GBR	5	300	10–6	Nekonverzační videohovory (vysílání ze záznamu)
4	GBR	3	50	10–3	Hry v Real-time režimu
5	Non-GBR	1	100	10–6	Signalizace IMS
6	Non-GBR	7	100	10–3	Hovor, video (živé vysílání), interaktivní hraní
7	Non-GBR	6	300	10–6	Video (vysílání ze záznamu)
8	Non-GBR	8	300	10–6	služby založené na TCP (WWW, e-mail, chat, FTP, sdílení souborů ...)
9	Non-GBR	9	300	10–6	

Obr. 7.1: Standardizované třídy identifikátorů QoS (QCI) v LTE [31]

## 7.2 Problematika QoS

QoS je síťově orientovaná, proto se soustředí na objektivní parametry kvality.

- **Delay** je doba mezi vysláním paketu a jeho doručením.
- **Jitter** je kolísání zpoždění. Nerovnoměrné zpoždění paketů je ovlivněné chováním sítě.
- **Packet loss** je procentuální vyjádření množství ztracených paketů.
- **Bandwidth** je šířka pásma a určuje velikost disponibilního datového toku.

Doporučené hodnoty jednotlivých QoS parametrů se liší v závislosti na použitých aplikacích.

V případě hlasových služeb jsou doporučené hodnoty:

- **delay** do 130 ms,
- **jitter** do 30 ms,
- **packet loss** ztrátovost do 1 procenta,
- **bandwidth** šířka pásma závisí na použitém kodeku.

### 7.2.1 Mechanismy zajištění QoS

Každá aplikace klade na síť, kterou pro přenos dat využívá, odlišné požadavky. S ohledem na tyto požadavky je pak nutné vhodně vybrat odpovídající mechanismy, které QoS a požadované vlastnosti sítě zajistí. Existují tři základní mechanismy: **Best Effort**, **integrovane služby**, **diferencovane služby**. V prostředí bezdrátových sítí podle standardu IEEE 802.11 pak ještě existuje rozšíření WMM, které umožňuje QoS již na úrovni linkové vrstvy.

## Best Effort

Mechanismus Best Effort je základním způsobem zajištění kvality služby. V Best Effort sítích nejsou aplikovány žádné QoS mechanismy, provoz je obsluhován na bázi FCFS (First-come, first-served). Dochází zde ke snaze data doručit co nejrychleji a nejefektivněji do cíle. V praxi to znamená, že množství prostředků dostupných uživatelům či síťovým službám je vždy závislé na aktuálním provozním zatížení sítě. Dosažitelná rychlost, odezva či ztrátovost se tak v čase může výrazně lišit. Nepředvídatelnost takových sítí je důvodem, proč nejsou v dnešní době příliš vhodné pro provoz aplikací náročných na QoS.

## Integrované služby

Model integrovaných služeb (IntServ) staví na myšlence rezervace síťových zdrojů. Před každým přenosem toku dat se koncový uzel nejprve pokusí o vyhrazení šířky pásma, kterou pro přenos potřebuje. Tato rezervace zajistí potřebné zdroje napříč celou sítí. Pokud je úspěšná, může uzel data přenášet. Po celou dobu přenosu je pak vyhrazené pásmo dostupné pouze jemu. O rezervaci pásma se stará protokol RSVP (Resource Reservation Protocol).

Integrované služby rozlišují tři třídy provozu: **Best Effort Service**, **Controlled Load Service** a **Guaranteed Service**.

IntServ je zároveň jediným mechanismem, který umožňuje komunikaci s garantovanou šířkou pásma. V případě velkého množství rezervací může dojít k vyčerpání kapacity sítě. Když toto nastane, protokolu RSVP se nepodaří alokovat potřebnou kapacitu a proto se přenos dat neuskuteční. Nevýhodou tohoto mechanismu je náročnost na systémové zdroje směrovačů, které se na alokaci podílejí a menší možnosti třídění provozu.

## Diferencované služby

Model diferencovaných služeb (DiffServ) je dnes nejpoužívanějším QoS mechanismem. Tento model umožňuje rozdílné zacházení s pakety patřícími do jednoho toku. Stejně třídy provozu mohou mít na každém směrovači rozdílnou prioritu. Diferencované služby také nabízí výrazně vyšší počet tříd provozu. Těch může být až 64, díky čemuž docílíme mnohem jemnějšího rozlišení síťového provozu. Informace o třídě provozu je u DiffServ uchována v každém paketu v IP záhlaví v 6bitovém poli DSCP. Kvůli absenci dopředné rezervace pásma není tento model náročný na systémové zdroje. Nenabízí sice skutečnou garanci potřebného pásma, ale vhodným nastavením se však tomuto chování blíží.

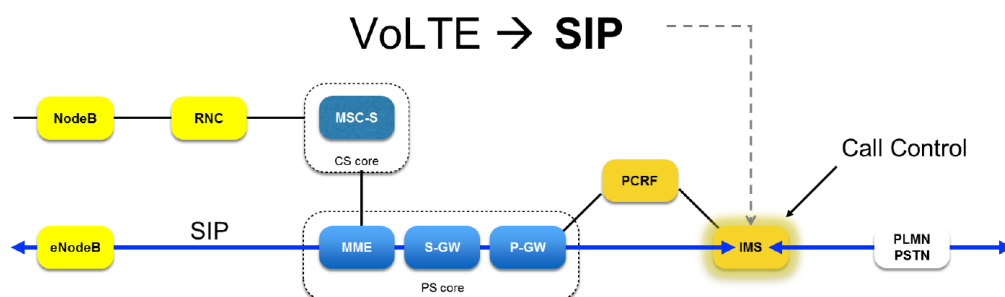
## 8 VOLTE A VOWIFI

### 8.1 VoLTE

VoLTE (Voice over LTE) je technologie umožňující přenášet hlasové hovory přes síť LTE. K přenosu se využívá infrastruktura IMS (IP Multimedia Subsystem) a specifické profily pro řídicí a hlasové služby v LTE.

Cílem je přenos hlasových služeb v LTE nezávisle na starších sítích s přepojovacím okruhem (tzv. CS-fallback, který používají LTE zařízení bez schopnosti VoLTE nebo pokud tato technologie není podporována operátorem). VoLTE má trojnásobnou kapacitu pro přenos dat než 3G. Také lépe využívá kapacitu pásma, protože hlavičky VoLTE paketů jsou menší než u VoIP/LTE.

Hovory v síti VoLTE mají výhodu rychlého spojování účastníků hovoru (2s) a nepřerušování datového toku.



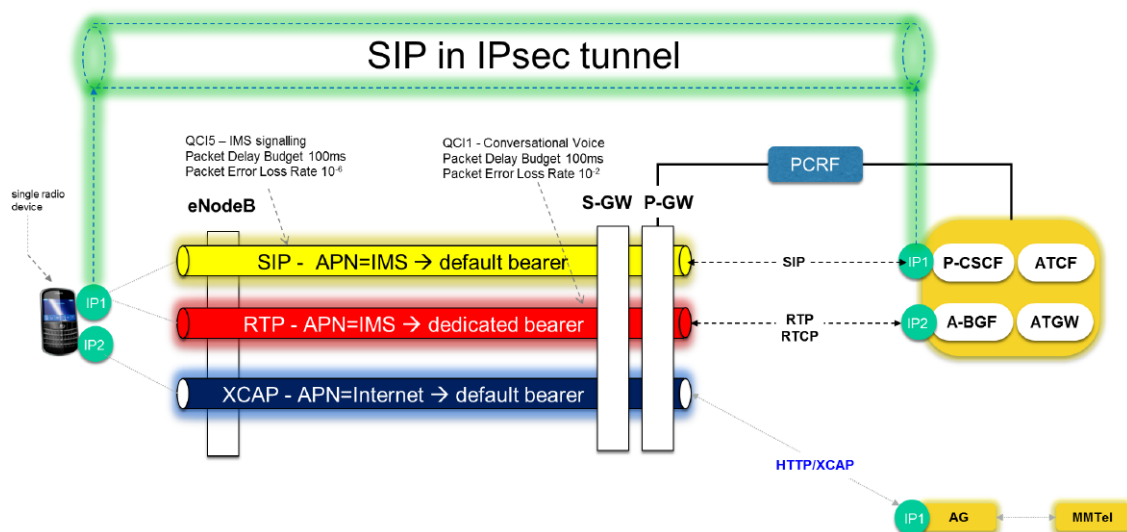
Obr. 8.1: Princip VoLTE [31]

#### 8.1.1 Kvalita hlasu

Pro zajištění zpětné kompatibility vyžaduje 3GPP minimálně kodek AMR-NB (Adaptive Multi-Rate Narrow Band), ale doporučeným kodekem pro hovor v síti VoLTE je AMR-WB (Adaptive Multi-Rate Wideband), známý také jako HD Voice. Tento kodek je povinný v 3GPP sítích, které podporují 16 kHz vzorkování.

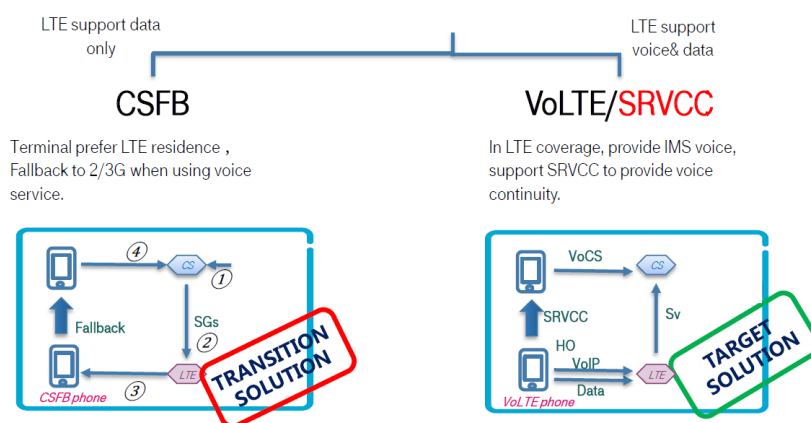
Fraunhoferův institut navrhl a vyzkoušel novou implementaci kodeku AAC-ELD (Advanced Audio Coding-Enhanced Low Delay) označovanou jako Full-HD Voice pro mobilní telefony v síti LTE. Zatímco předchozí hlasové kodeky podporovaly pouze frekvence do 3,5 kHz a audio služba označovaná jako HD Voice do 7 kHz, Full-HD Voice přenáší celé slyšitelné pásmo 20 Hz-20 kHz. Aby však bylo možné uskutečnit hlasové spojení mezi dvěma účastníky, musí tento kodek podporovat oba mobilní telefony i síť.





Obr. 8.2: SIP v LTE [31]

## VoLTE v jádru



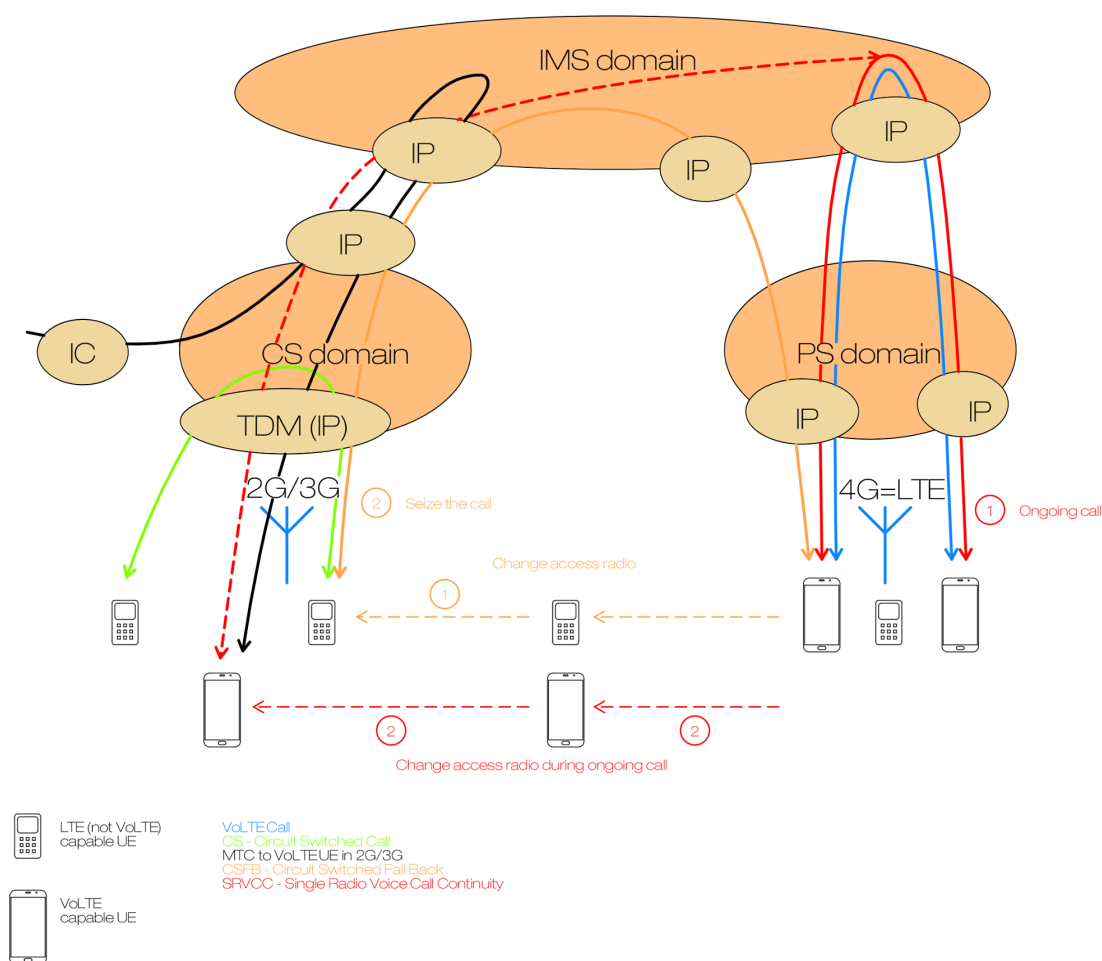
Obr. 8.3: Úspěšné volání VoLTE [31]

## 8.2 VoWiFi

VoIP protokol se vztahuje k posílání hlasových dat přes internet, po nástupu

## 8.3 Handover mezi VoLTE a VoWiFi

Každé zařízení když je připojeno k síti LTE, provede registraci v IMS a poté vytvoří tunel IPSEC s P-CSCF. V případě, že se tato registrace uskuteční přes síť WiFi,



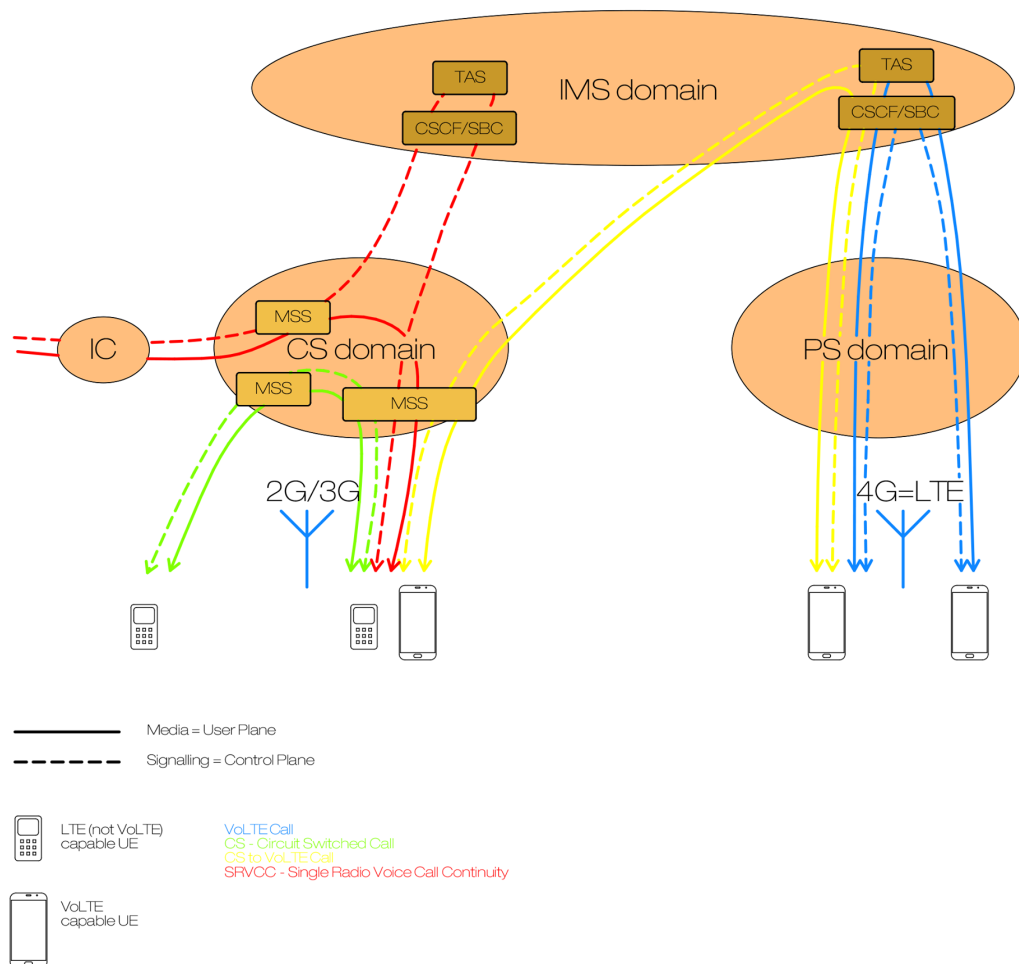
Obr. 8.4: Signalizace a trasa dat v IMS

vytvoří se dva tunely IPSEC - vnější tunel mezi přístrojem a ePDG a vnitřní tunel mezi zařízením a P-CSCF. Hlasové pakety zůstávají vždy ukotveny na PGW. Při handoveru z technologie VoLTE na VoWiFi se používají dva způsoby, podle toho kde a jak bylo spojení navázáno.

Pokud se volání naváže přes VoLTE, pak se hlas přenáší na VoWiFi, tak dojde k vytvoření tunelu IPSEC se zavedeným ePDG a také bude vytvořen GTP tunel mezi ePDG a SAE GW k ukotvení nosiče z ePDG do PGW.

Nebo se volání naváže přes VoWiFi a hlas se poté načte do VoLTE. V tomto případě je vytvořen rádiový nosič a hlasové pakety RTP z UE budou procházet přes SGW / PGW namísto ePDG.

V obou případech by se adresa IP UE nesměla měnit, v opačném případě bude hovor přerušen, protože se vazba kontaktů v S-CSCF změní. V protokolu SIP REGISTER je vytvořena událost o handoveru (přepnutí). Aby byla zachována trvanlivost



Obr. 8.5: Volání přes CS, VoLTE, CSFB a SRVCC

protokolu IP, je upřednostňována důvěryhodná síť (Trusted WAN) a přístupová síť metropolitních sítí WiFi. V případě, že používáme nedůvěryhodnou síť WiFi (veřejná WiFi), nepřetržitost IP nemusí být zachována, což může vést k přerušení služby.

## 8.4 IP Multimedia Subsystem (IMS)

IMS obsahuje všechny prvky jádra sítě pro poskytování IP multimediálních služeb. IMS rozšiřuje architekturu stávajících GSM/3G sítí o technologii přepojování paketů. IMS je třeba implementovat na straně sítě i na straně koncového zařízení. Základními komponenty IMS jsou servery s funkcemi řízení volání CSCF (Call State Control Function). Tyto funkce jsou celkem tři.

- **P-CSCF** (Proxy Call State Control Function) je proxy server mezi uživatelem a sítí. Signalizační výměna zpráv protokolu SIP probíhá mezi uživatelem a sítí

vždy přes P-CSCF bez ohledu na umístění uživatele.

- **I-CSCF** (Interrogating Call State Control Function) je použit jako prvotní signalizační kontakt, když iniciátor SIP relace neví, který S-CSCF použít.
- **S-CSCF** (Serving Call State Control Function) provádí různé akce v rámci celého systému, má řadu rozhraní pro komunikaci s ostatními prvky v síti.

**HSS** (Home Subscriber Server) je hlavní účastnická databáze v IMS. Zprostředkovává informace o účastnících ostatním prvkům v síti IMS.

**AS** (Application Server) poskytuje specifické IP aplikace (např. posílání zpráv).

Účastnický S-CSCF je zodpovědný za IMS hovory v síti LTE. Spojení se S-CSCF je zprostředkováno přes P-CSCF. Klíčovým prvkem ve schopnosti sestavit hovor je postup objevování P-CSCF, který dále řeší závislost na používané síti a lokalizaci v síti. Kontinuita hovorů je zajištěna pomocí handoveru na starší technologie, jako je GSM/3G. Toho je dosaženo funkcí nazvanou SRVCC (Single Radio Voice Call Continuity).

## 8.5 Evolved Packet System (EPS)

Zkratka LTE značí rádiovou přístupovou síť RAN (Radio Access Network). Ovšem chceme-li plnohodnotné 4G (LTE-A), je nutné RAN doplnit jádrem sítě EPC (Evolved Packet Core). RAN a EPC je označován jako vyvinutý paketový systém EPS (Evolved Packet System). Přístupová síť je optimalizovaná pro přenos IP paketů a podporuje služby vyžadující konstantní zpoždění, konstantní přenosovou rychlost i služby bez nároků na síťové parametry.

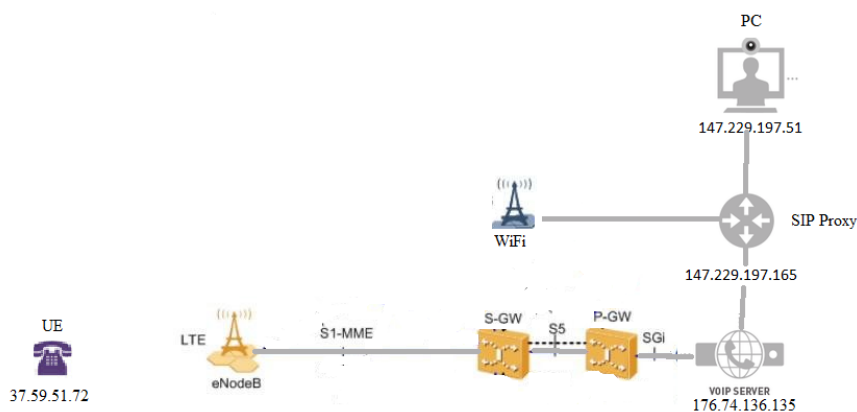
Páteční síť je složena pouze z jedné části, která podporuje všechny služby v paketové podobě (založená na IMS) a která zprostředkovává komunikaci s telefonními sítěmi typu PSTN (Public Switched Telephone Network). Část CS již není přítomna a všechny aplikace jsou podporovány přes část PS. To samozřejmě vyžaduje specifické hraniční uzly a brány (součásti architektury IMS) takové, které převádí IP provoz do sítí s přepojováním okruhů (PSTN). Standardizační proces při tvorbě EPS byl uzpůsoben tak, aby i při takovém zjednodušení sítě byla zachována návaznost spojení mezi starými a novými systémy.

## 9 PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části jsem vyzkoušel tři typy handoveru - Inter-MME využívající rozhraní X2, Inter-MME z technologie LTE na 3G a Inter-RAT Handover z VoLTE na VoWiFi.

### 9.1 Základní topologie sestavené sítě

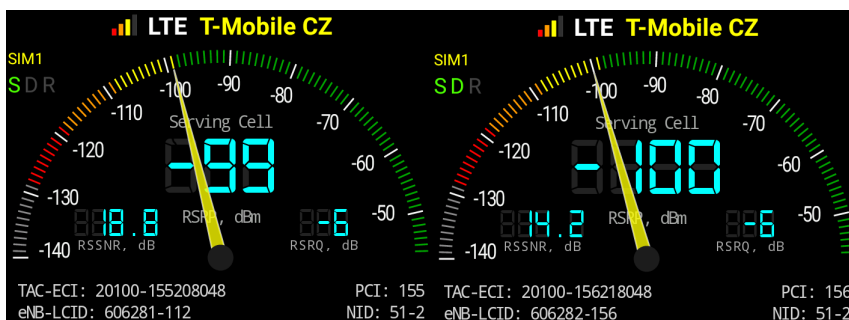
Topologie sítě na následujícím obrázku znázorňuje připojení UE k LTE síti pomocí eNodeB, který je připojen pomocí rozhraní S1-MME k S-GW. S-GW je připojeno pomocí rozhraní SGi k vnější síti.



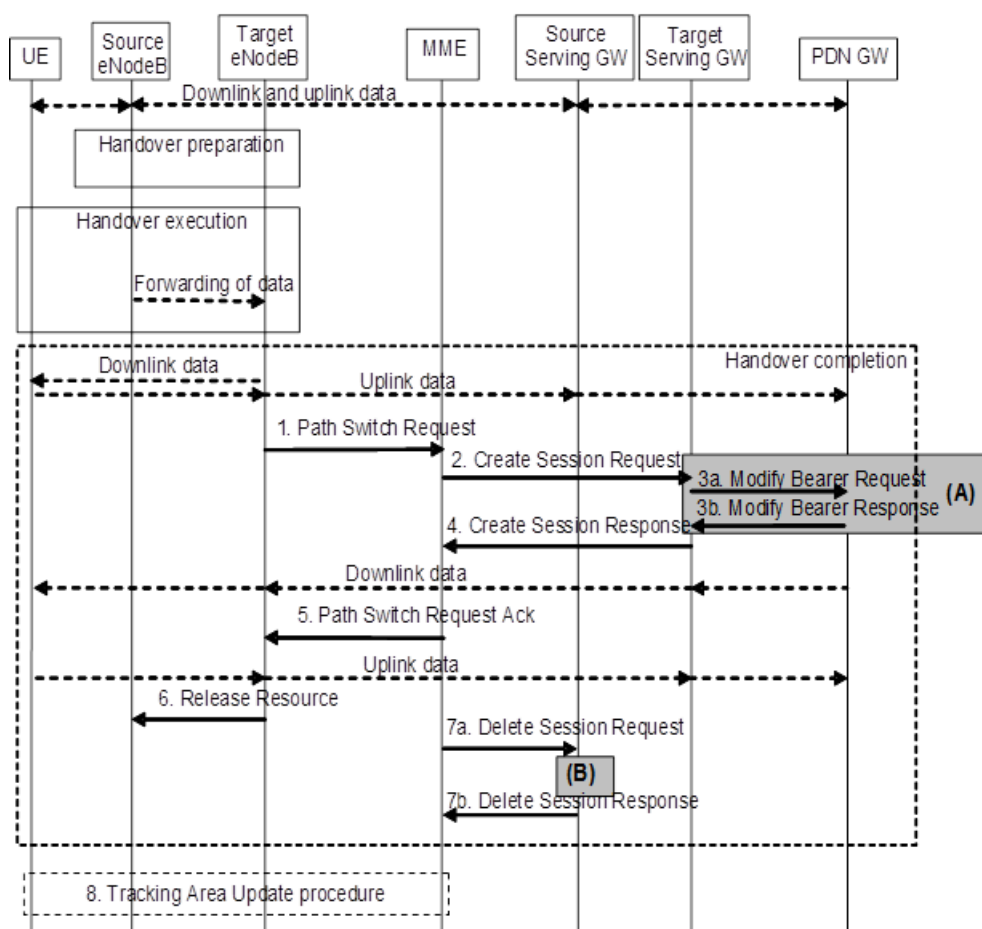
Obr. 9.1: Topologie sítě

### 9.2 Handover v LTE - Inter-MME využívající X2 a Inter-RAT)

K tomuto handoveru dochází, když je cílový a zdrojový eNodeB ve stejném okruhu s MME. Tento handover byl testován na telefonu s rootem (Xiaomi 3S), který umožňuje manuální výběr eNodeB. Následující obrázek ukazuje připojení UE k eNodeB a připojení k cílovému eNodeB po provedení handoveru.



Obr. 9.2: Inter-MME handover přes X2



Obr. 9.3: Inter-MME call flow

## 9.3 Handover VoLTE a VoWiFi

Při realizaci tohoto handoveru musí být vysvětleno označení VoLTE a VoWiFi. VoLTE (Voice over LTE) je standard volání pro mobilní telefony v síti LTE. VoWiFi (Voice over WiFi) zatím není nijak standardizován a označuje pouze volání skrze

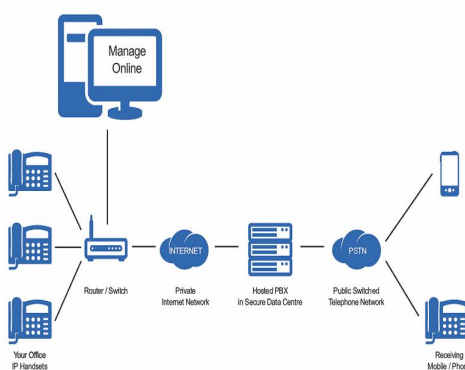
WiFi síť, nejčastěji pomocí protokolu VoIP. Operátoři ovšem tento význam VoWiFi změnili a označují tímto volání přes WiFi do sítí operátorů přes IMS. Koncové zařízení však musí podporovat VoLTE, současně musí být povoleno a nastaveno na síť operátora ve firmwaru telefonu. Nejčastěji musí přímo pocházet z portfolia některého z operátorů. Proto jsem při realizaci tohoto handoveru využil protokolu SIP, který je užíván v sítích operátora T-Mobile pro VoLTE a VoWiFi. Síť operátorů jsou lépe připraveny na handovery, které díky tomu probíhají rychleji a s nižším poklesem QoS. Toho je dosaženo pomocí lepší signalizace cesty a vlastní optimalizací koncových zařízení z portfolia operátora. Při tomto přepnutí jsem se co nejvíce snažil přiblížit struktuře sítě operátora a jeho nastavení. Zejména QoS na WiFi (AP) pro zajištění nejlepší kvality služeb také pomocí kodeku SPEEX, který je podobný s kodekem EVS, který je licencovaný a používají jej operátoři.

O nalezení cesty a signalizaci se v tomto handoveru stará protokol SIP, který využívá možnosti Re-INVITE a Session mobility. UE je připojen k SIP serveru, který je součástí

## 9.4 Sestavení sítě pomocí virtuálního PBX (Asterisk)

Asterisk je pobočková ústředna, která implementuje telefonní ústřednu (PBX) pomocí počítače nebo virtuálního stroje.

Sestavení sítě probíhalo nainstalováním PBX běžící pod Linuxem na virtuální stroj a jeho nastavením pro připojení koncových UE. Protože tento stroj běžel na počítači bez veřejné IP adresy, a k tomu byl za NATem, musel jsem připojit Asterisk k poskytovateli internetové telefonie Linphone pomocí SIP TRUNK.



Obr. 9.4: Virtuální pobočková ústředna

## 9.5 Sestavení sítě pomocí hostovaného PBX na Google Cloud

Sestavení této sítě je analogické se sestavením v předchozí části. Rozdílem je zde veřejná IP adresa, proto není nutné používat SIP TRUNK. Pobočková ústředna byla exportována a následně připojena a nastavena na Google Cloud.

## 9.6 Sestavení sítě pomocí hostovaného PBX 3CX

Při realizaci tohoto spojení jsem využil nabídky 3CX, která nabízí bezplatnou verzi PBX pro nekomerční užití. Samotné nastavení probíhalo podobně jako u Asterisku.

## 9.7 Nastavení koncových zařízení

### 9.7.1 Nastavení PC - Linphone

Každé koncové zařízení musí být zaregistrováno k pobočkové ústředně, kde musí být nastaveno. Zejména se jedná o totožnost UE ([martinekpc@sip.linphone.org](mailto:martinekpc@sip.linphone.org) v případě virtuálního PBX Asterisk) a o adresu SIP proxy ([sip.linphone.org](http://sip.linphone.org))

#### Opus - náhrada za EVS

Jako náhradu za kodek EVS v sítích VoLTE a VoWiFi u operátorů jsem zvolil kodek Opus, který je srovnatelný. Tento kodek byl nastaven na bitrate 50 Kbps při kmitočtu 48 000 Hz.

#### AMR-WB náhrada za G722

Náhradu za kodek AMR-WB (G722.2) jsem zvolil kodek G722, z něž AMR-WB pochází.

### 9.7.2 Nastavení mobilního zařízení (UE) - Android

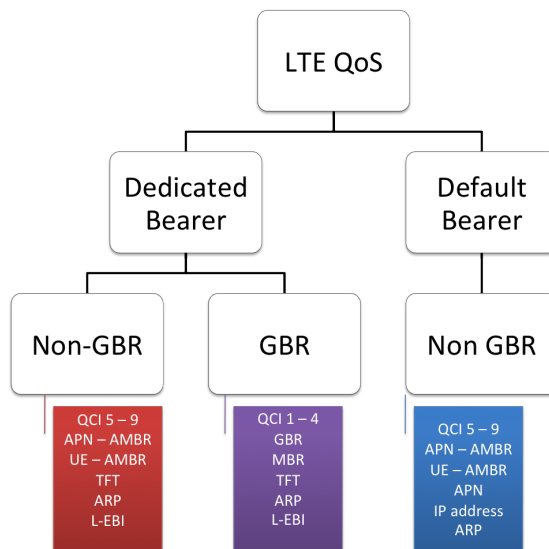
#### Nastavení systému android

Systém Android má různá nastavení pro připojení a odpojení k LTE síti, tak WiFi. Nejčastěji se jedná o možnost v nastavení Always data active a Aggressive handover. Jedná se o nastavení zařízení za jakých podmínek se přepne nebo se bude snažit udržovat připojení stále aktivní.



Codec	Bitrate (kb/s)	Frame (ms)	Bits per frame	Algorithmic delay <sup>a</sup> (ms)	Codec delay <sup>b</sup> (ms)	Compression type	Complexity (MIPS) <sup>c</sup>	MOS
<i>Narrowband codecs</i>								
G.711	64	0.125	8	0.125	0.25	PCM	≪1	4.1 <sup>d</sup>
G.723.1	6.3	30	189	37.5	67.5	MP-MLQ	≪18	3.8
G.723.1	5.3	30	159	37.5	67.5	ACELP	≪18	3.6
G.726	16	0.125	2	0.125	0.25	ADPCM	≈1	–
G.726	24	0.125	3	0.125	0.25	ADPCM	≈1	3.5
G.726	32	0.125	4	0.125	0.25	ADPCM	≈1	4.1
G.728	16	0.625	10	0.625	1.25	LD-CELP	≈30	3.61
G.729	8	10	80	15	25	CS-ACELP	≪20	3.92
G.729A	8	10	80	15	25	CS-ACELP	≪11	3.7
G.729D	6.4	10	64	15	25	CS-ACELP	<20	3.8
G.729E	11.8	10	118	15	25	CS-ACELP LPC	<30	4
GSM-FR	13	20	260	20	40	RPE-LTP	≈4.5	3.6
GSM-HR	5.6	20	112	24.4	44.4	VSCELP	≈30	3.5
GSM-EFR	12.2	20	244	20	40	ACELP	≈20	4.1
AMR-NB	4.75–12.2	20	95–244	25	45	ACELP	15–20	3.5–4.1
iLBC	13.33	30	400	40	60	LPC	18	3.8
iLBC	15.2	20	304	25	40	LPC	15	3.9
Speex (NB)	2.15–24.6	20	43–492	30	50	CELP	8–25	2.8–4.2
BV16	16	5	80	5	10	TSNFC	12	4
<i>Broadband codecs</i>								
G.722	48, 56, 64	0.0625	3–4	1.5	1.5625	SB-ADPCM	5	~4.1
G.722.1	24, 32	20	480, 640	40	60	MLT	<15	~4
AMR-WB (G.722.2)	6.6–23.85	20	132–477	25	45	ACELP	≈38	Various
Speex (WB)	4–44.2	20	80–884	34	50	CELP	8–25	Various
iSAC	Variable	Adaptive	Adaptive-variable	Frame + 3 ms	Adaptive	Transform coding	6–10	Various <sup>e</sup>
BV32	32	5	160	5	10	TSNFC	17.5	~4.1

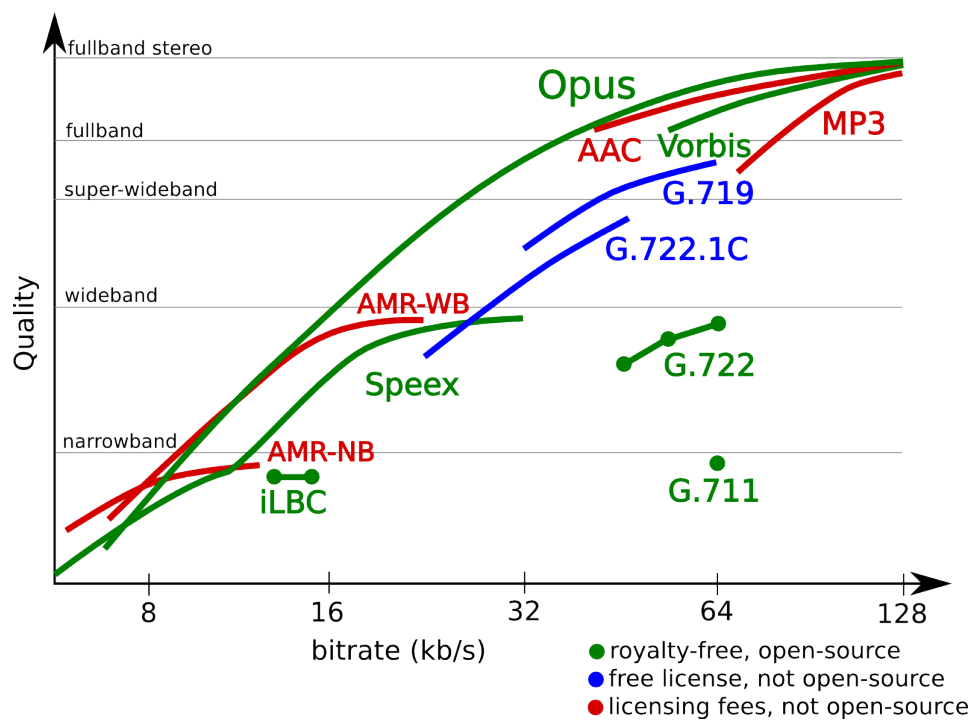
Obr. 9.5: Porovnání kodeků



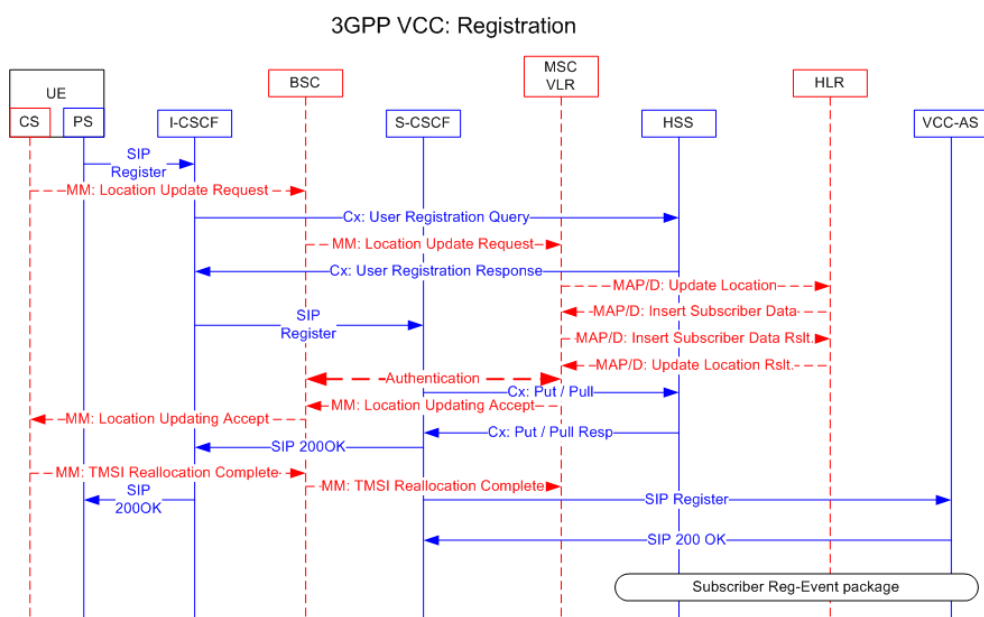
Obr. 9.6: Rozdělení LTE QoS

## Nastavení aplikace VoIP pro Android

Nastavení SIP serveru a dále nastavení omezení bitrate a kodeků na kodek, který byl testován.



Obr. 9.7: Srovnání audio kodeků dle kvality a bitrate



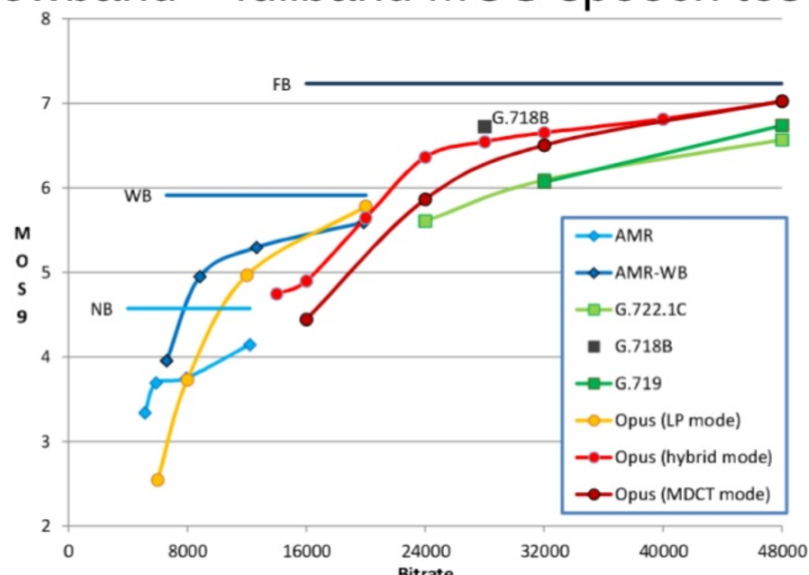
Obr. 9.8: 3GPP VCC: Registrace

## 9.8 Porovnání handoveru QoS VoLTE a VoWifi

QCI	Resource type	Priority	Packet delay budget	Packet error loss rate	Example services
1	GBR	2	100 ms	$10^{-2}$	Conversational voice
2		4	150 ms	$10^{-3}$	Conversational video (live streaming)
3		3	50 ms	$10^{-3}$	Real time gaming
4		5	300 ms	$10^{-6}$	Non-conversational video (buffered streaming)
5	Non-GBR	1	100 ms	$10^{-3}$	IMS signaling
6		6	300 ms	$10^{-6}$	Video (buffered streaming), TCP-based (e.g., www, e-mail, chat, ftp, p2p file sharing, progressive video, etc.)
7		7	100 ms	$10^{-6}$	Voice, Video (live streaming), Interactive gaming
8		8	300ms	$10^{-3}$	Video (buffered streaming), TCP-based (e.g., www, e-mail, chat, ftp, p2p file sharing, progressive video, etc.)
9		9		$10^{-6}$	

Obr. 9.9: Srovnání tříd kvality u LTE QoS

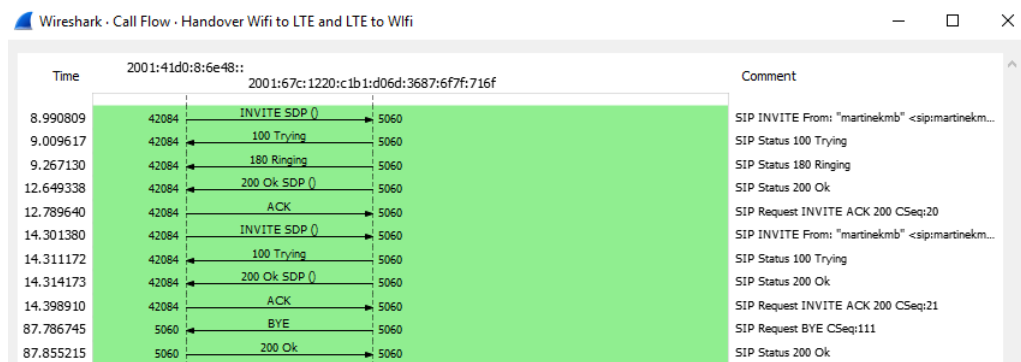
- Narrowband – fullband MOS speech test



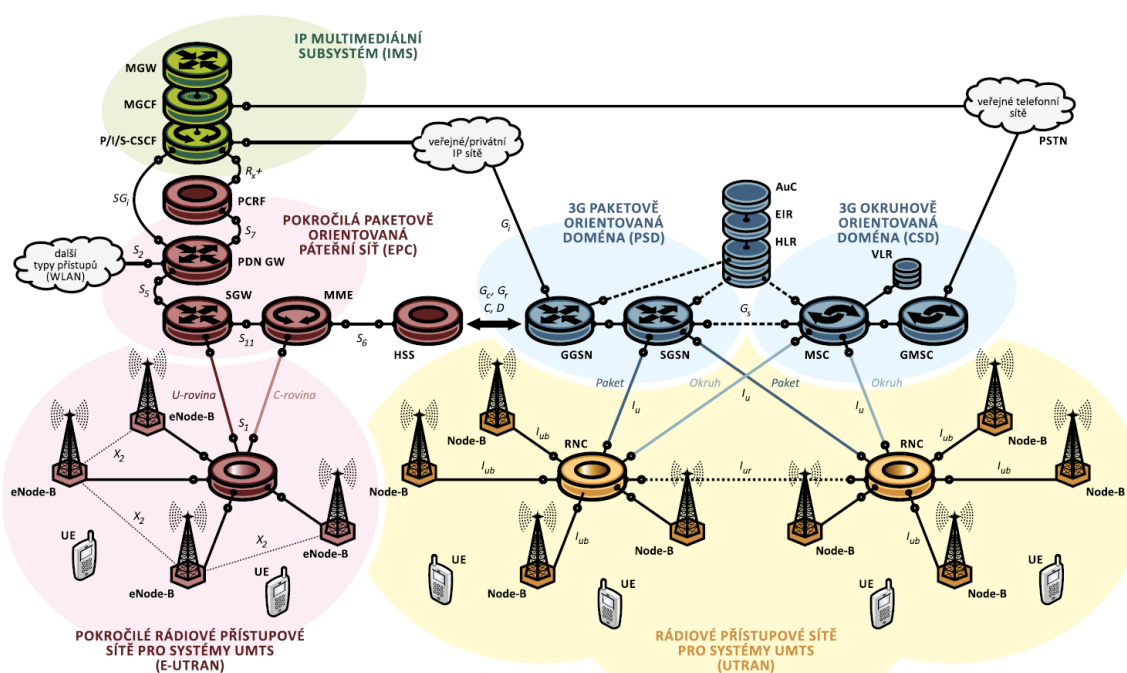
Obr. 9.10: Porovnání kodeků - MOS9

Tab. 9.1: Porovnání QoS handoveru sítí (Jitter[ms], Delay[ms], Packet Loss[%])

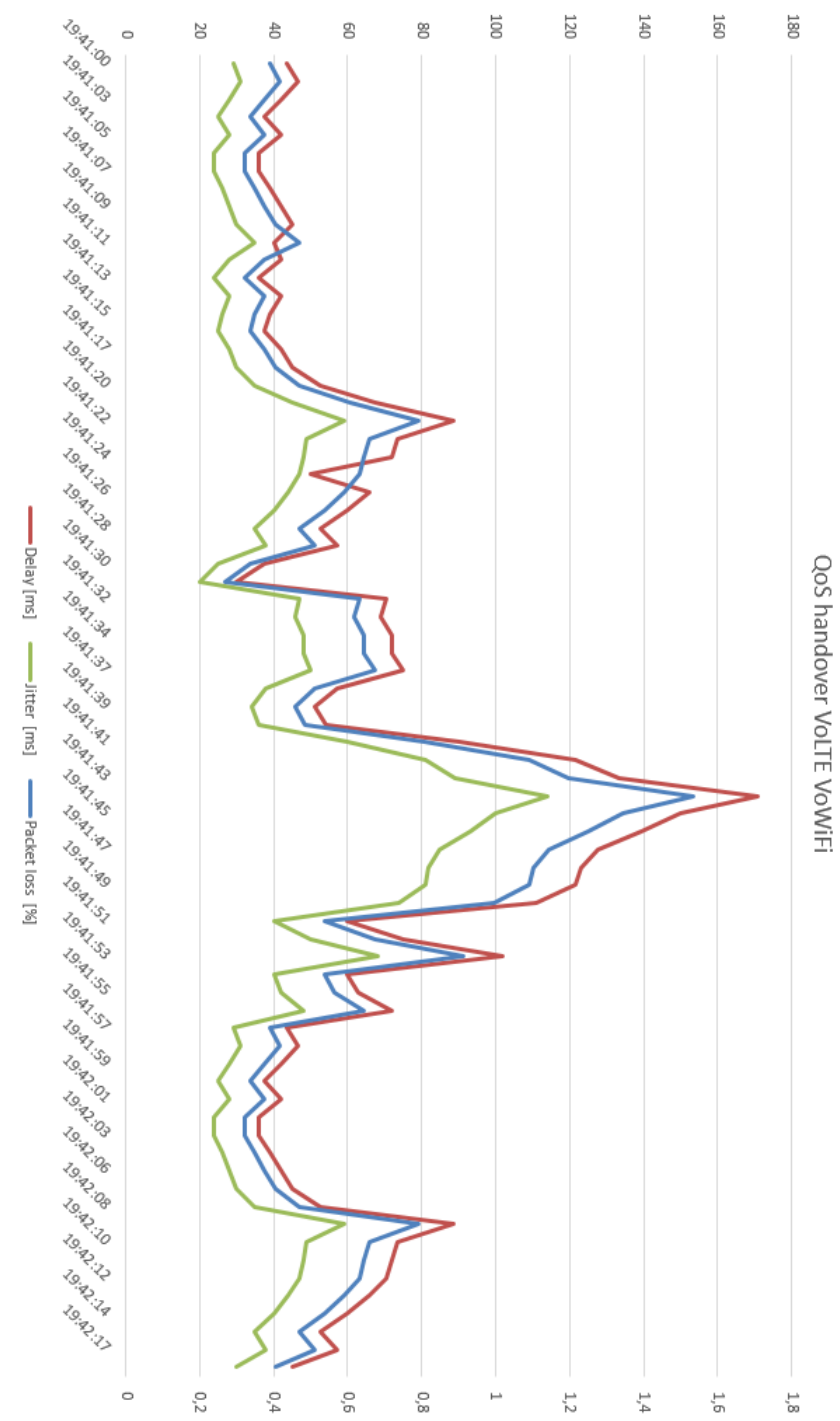
Průměr za měření	Jitter min	Jitter max	Delay min	Delay max	Packet loss
VoLTE	15	29	10	126	0,6
VoWifi	20	30	12	134	1,2
LTE	22	31	20	152	0,8
Wifi	35	40	22	140	2,1
VoIP	30	38	28	120	1,3



Obr. 9.11: Handover Wifi-LTE a LTE-WiFi - flow graf



Obr. 9.12: Architektura mobilních sítí



Obr. 9.13: QoS Handoveru VoLTE a VoWifi

Díky připojení mobilu a notebooku na stejnou základovou stanici WiFi jsem byl schopen odchyťovat síťový provoz na notebooku pomocí programu Wireshark. Připojení mobilu k WiFi a LTE síti bylo zdokumentováno pomocí log souborů programem Network Signal Info.

### 9.8.1 Graf QoS handoveru VoLTE, VoWifi

Na grafu můžeme vidět výkyv QoS, v řádu milisekund (20ms) a následné navázání ztraceného VoLTE signálu signálem WoWifi. Telefon po celou dobu spojení s WiFi udržoval spojení s LTE signálem a po 50 ms výpadku spojení ho toto LTE spojení zcela nahradilo. Výkyvy LTE spojení na začátku grafu jsou způsobené metodami ověřování mobilního spojení.

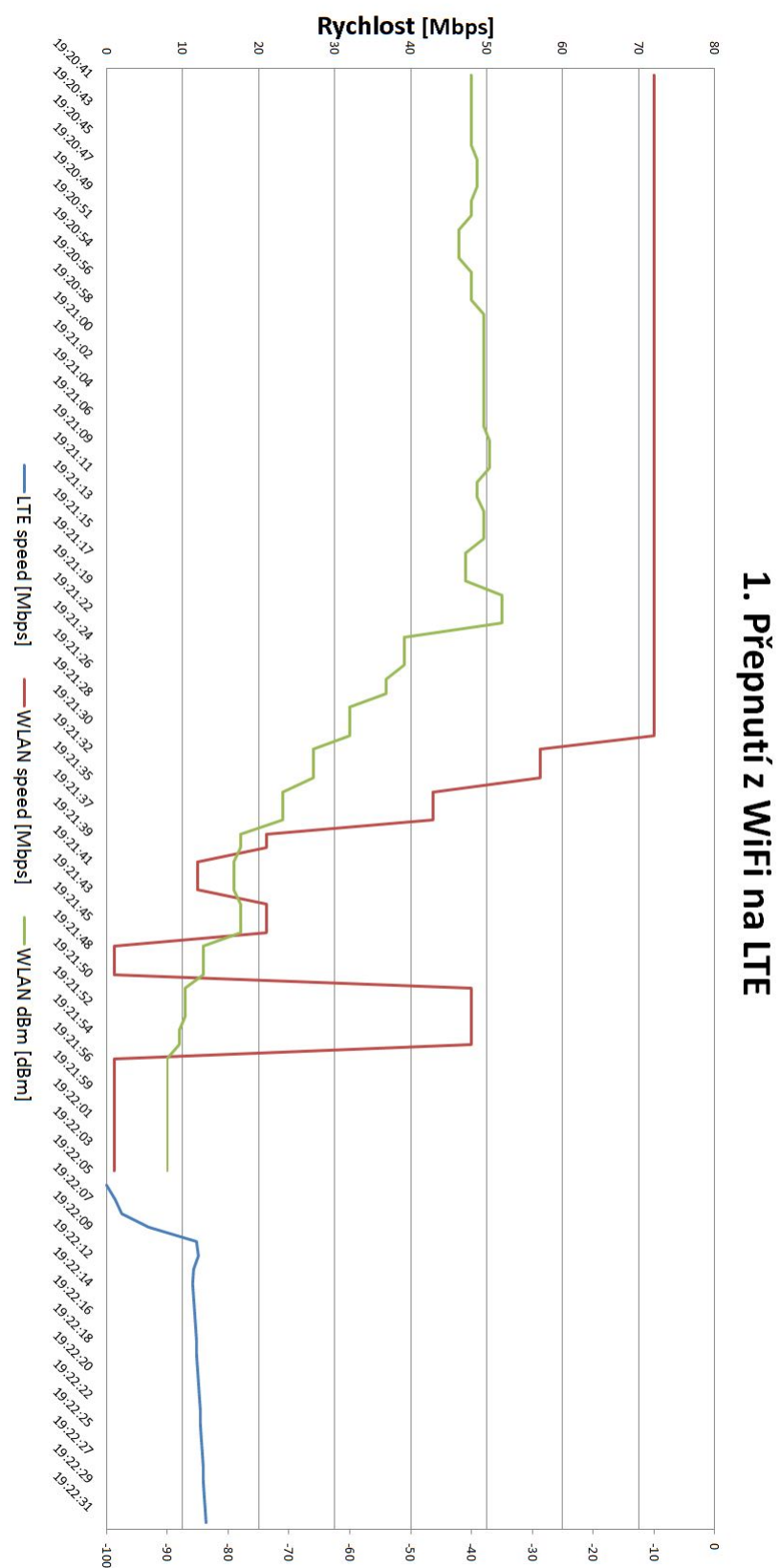
Tyto metody jsou celkem tři:

**ISP initial connection check** Ověření, jestli je telefon registrován v GSM síti (kontrola spojení). Nezpůsobuje žádné přenosy dat.

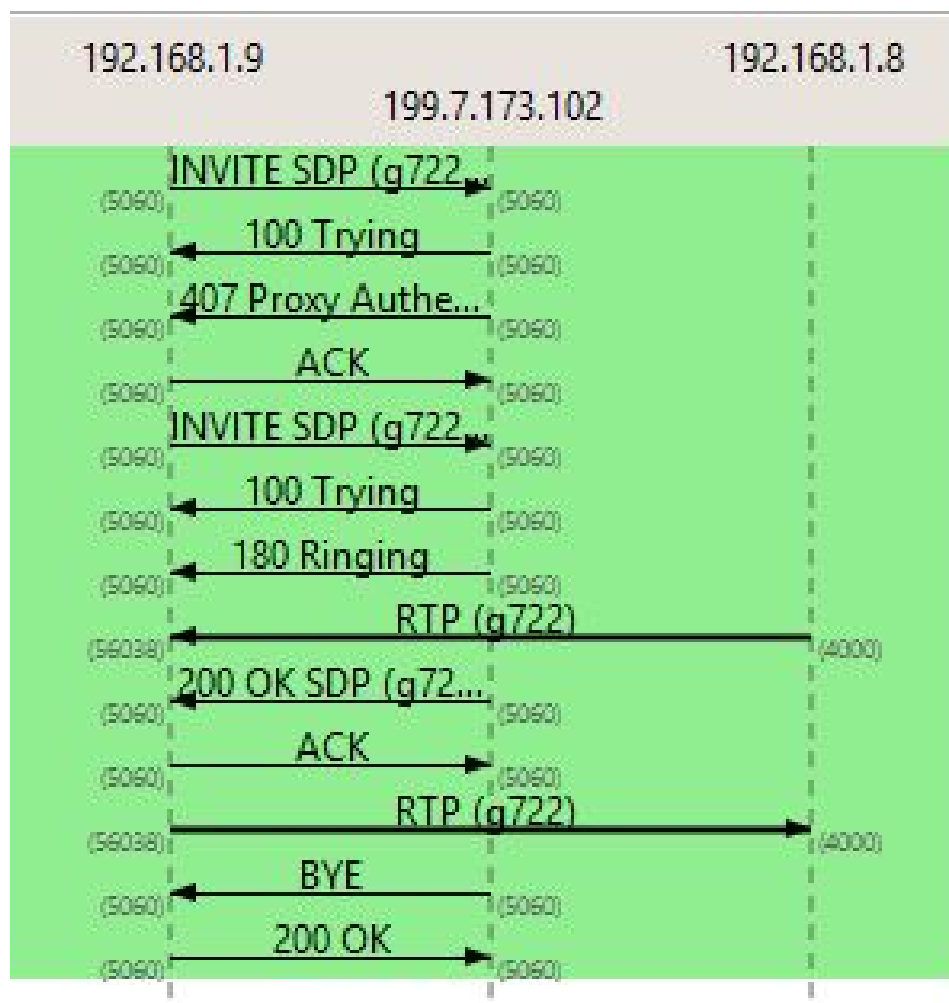
**Cellular connection alive check** Ověřuje, zda jsou přenášena data. Pokud ne, ověřuje odezvu na ping a pokud odezva není, pokusí se o nové GPRS spojení. Pokud nejsou přenášena žádná data, způsobuje další ICMP komunikaci (Internet Control Message Protocol - používá se pro odesílání chybových zpráv, například pro oznámení, že požadovaná služba není dostupná).

**Packet-level connection check** Periodicky ověřuje odezvu na ping od vzdáleného systému a pokud odezva není, pokusí se modem o nové GPRS spojení. Trvalá periodická ICMP komunikace.

Podobně jako při prvním měření lze na flow grafu vidět, jak se při tomto přepnutí mobil dotazuje SIP serveru na znovunavázání spojení.



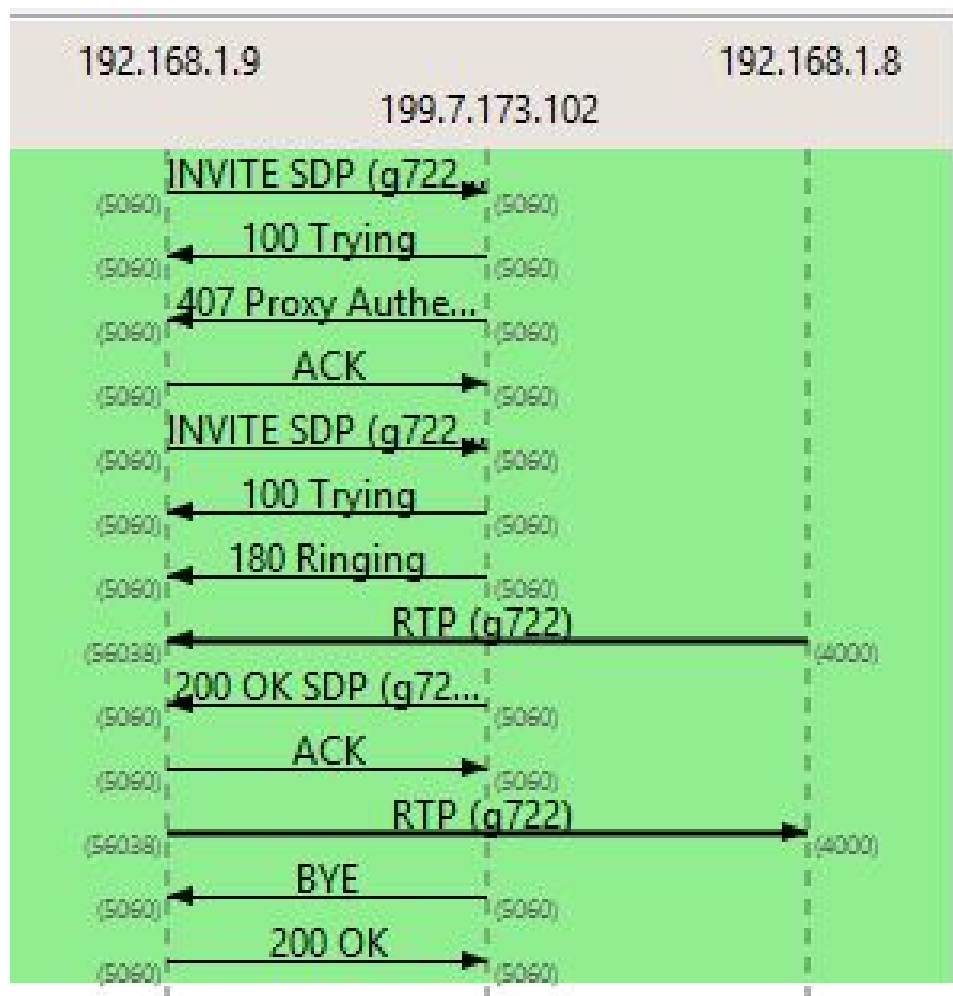
Obr. 9.14: 1. Přepnutí z WiFi na LTE



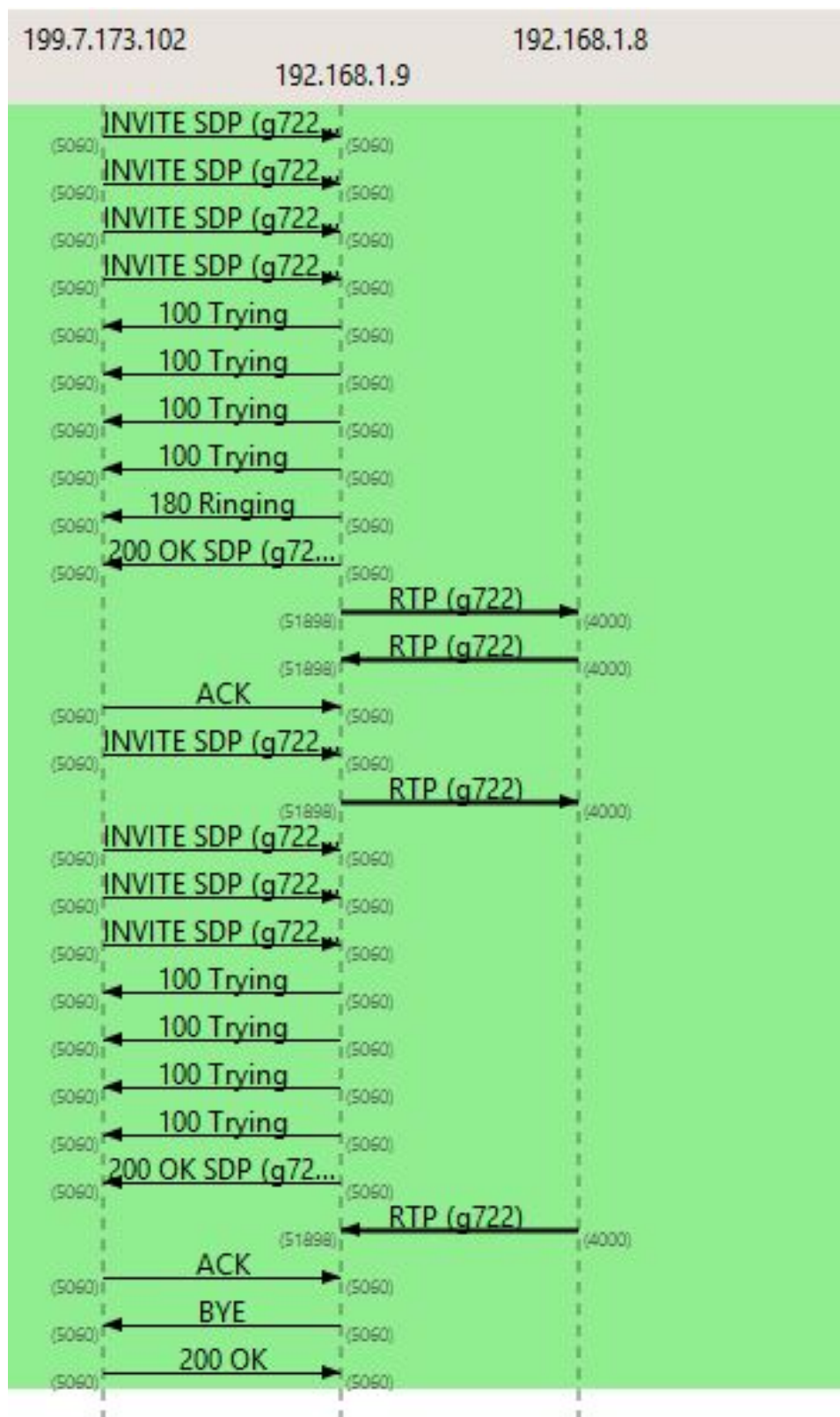
Obr. 9.15: 1. Přepnutí z WiFi na LTE - flow graf

192.168.1.9 - Adresa mobilního zařízení 192.168.1.8 - Adresa PC

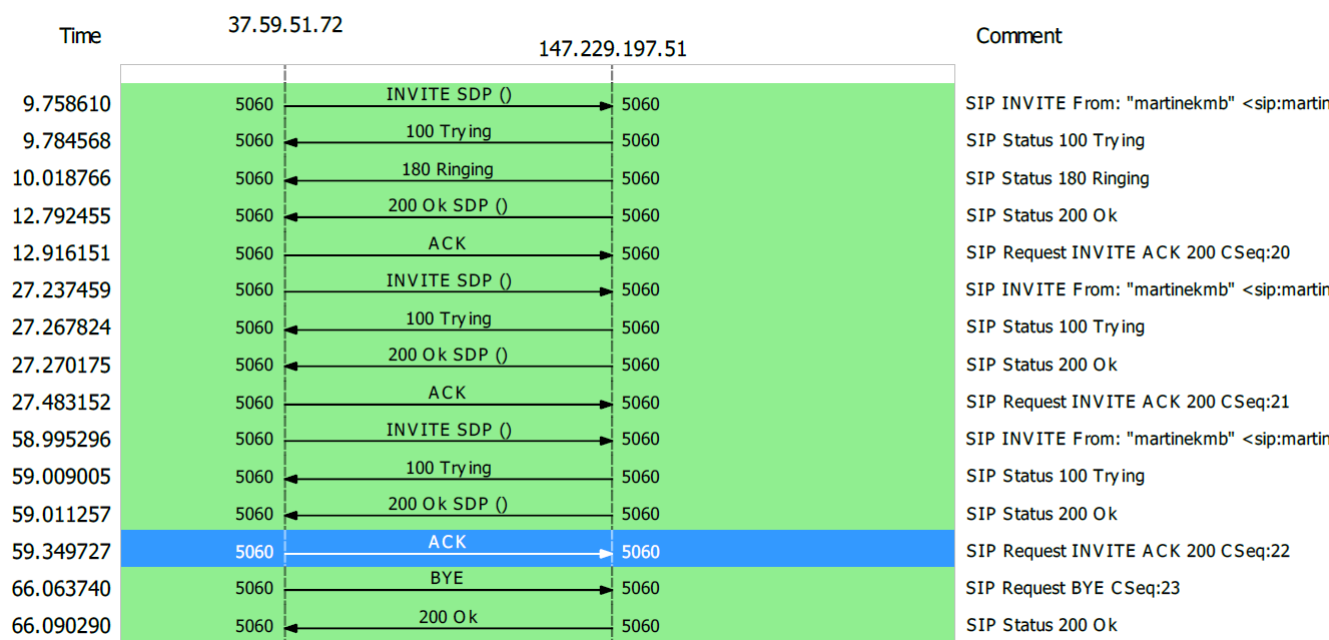




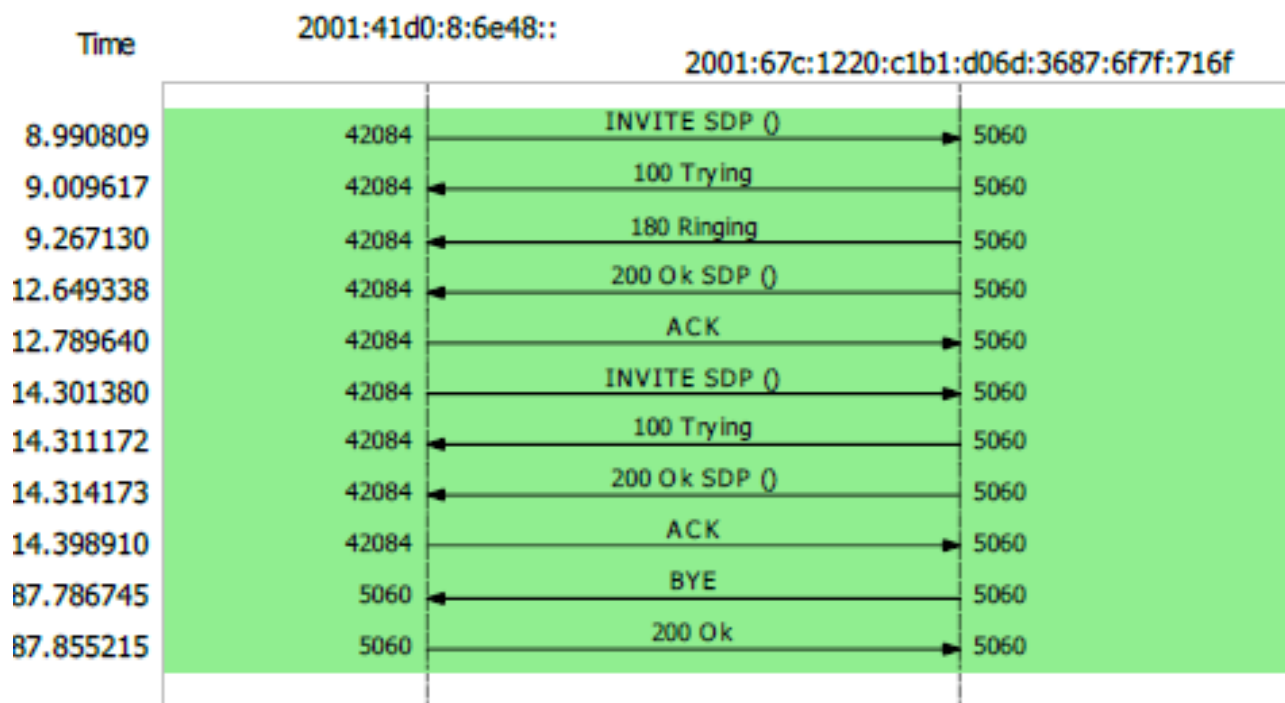
Obr. 9.16: Přepnutí z VoLTE na VoWiFi - flow graf



Obr. 9.17: Handover z WiFi na LTE - flow graf



Obr. 9.18: Handover z VoWiFi na VoLTE - flow graf - virtuální PBX



Obr. 9.19: Handover z VoWiFi na VoLTE - flow graf - hostované PBX

## 10 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo teoretické seznámení s vlastnostmi i technologiemi bezdrátových sítí a dále grafický výstup problematiky přepnutí hovoru ze sítě VoLTE na VoWiFi bez ztráty spojení.

Testování probíhalo na platformách Android, Linux a Windows.

Nejlepších hodnot QoS bylo dosaženo při handoveru VoLTE na VoWiFi:

- Jitter 114 ms
- Delay 171 ms
- Packet Loss 1,3 %

Nejzásadnějšími faktory, které ovlivnily kvalitu handoveru, byly nastavení sítě WiFi, rušení způsobené ostatními sítěmi v okolí na frekvenci 2,4 GHz a ostatní elektromagnetické rušení. U navrženého testu by bylo možné dosáhnout ještě kvalitnějších výsledků, kdybych měl přístup k síti používané operátorem, případně kdybych dosáhl lepšího nastavení QoS na WiFi.

Mnou využívané nastavení QoS je garantované s následující tolerancí: Maximální hodnota ztráty paketů nepřesahuje 2% a maximální hodnota Jitter nepřesahuje 30 ms. Tento test byl také ovlivněn faktem, že na síti používané při testu bylo připojeno (a aktivně ji využívalo) více zařízení. Kvůli fyzickým limitacím zařízení, na kterých probíhal handover, není možno dosáhnout ideálních výsledků předání na úrovni, na jaké jej prezentují operátoři. Toto způsobilo Jitter v mém testu přesahující maximální garantované hodnoty.

Měření handoveru z VoLTE na VoWiFi proběhlo třikrát s různým nastavením:

Při měření v topologii ref 9.4 byl použit SIP server a SIP Trunk Linphone.

Při měření v topologii ref 9.5 byla k registraci UE s PBX požita veřejná IP adresa

Při měření v topologii ref 9.6 byl použit SIP server 3CX.

Výsledky viditelné v grafech (zejména výpadky spojení) odpovídají naměřeným hodnotám QoS ve stejném časovém úseku.

Hovor probíhal na telefonu Xiaomi 3S přes aplikaci CSipSimple a byl přijímán notebookem s aplikací Linphone, připojeným na stejnou síť WiFi. Síť byly monitorovány programem Wireshark v notebooku a aplikací Network Signal Info v telefonu. Zkoušení bylo postupné s různými nastaveními v systému Android. První měření probíhalo se základním nastavením připojování k sítím. Při druhém měření byla zapnuta funkce "Mobile data always active" a třetí měření mělo navíc zapnutou funkci "Aggressive WiFi to mobile handover". Tyto funkce jsou popsány v praktické části.

Při odpojení od sítě LTE došlo k bezešvému znovupřipojení k probíhajícímu VoIP hovoru, tedy k opětovnému připojení na SIP server. Probíhající hovor na straně posluchače byl bez výpadku. Po plném přepnutí hovoru z VoLTE na VoWiFi došlo k ustálení signálu a QoS bylo plně obnoveno.

Díky monitorovacím programům jsem získal potřebná data a dokázal sestavit graf tohoto přepnutí. Výstupem jsou grafy ref:

změny QoS při jednotlivých handoverech a graf toku dat.

V této práci byl proveden hlavní experiment - přepnutí hovoru z VoLTE na VoWiFi bez přístupu k síti 4G. Tato práce je podkladem pro další výzkum a porozumění problematiky handoveru.

# LITERATURA

- [1] *Využití rádiového spektra.*  
<http://spektrum.ctu.cz>
- [2] BĚLOHLÁVEK, J. Návrh typu modulace pro prostředí s rušením. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 55 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Radim Pust
- [3] FRIESEN, Jeff. Learn Java for Android Development, Berlin, 2010, Apress, 656 pages, ISBN-13: 9781430231561, ISBN-10: 1430231564
- [4] Aptilo in 3GPP Wi-Fi access. Mobile Data Offloading. [online]. 11.12.2015 [cit. 2015-12-11]. Dostupné z: <http://www.aptilo.com/mobile-data-offloading/3gpp-wifi-access>
- [5] Key challenges with automatic Wi-Fi / Cellular handover. The 3G4G Blog. [online]. Monday, 4 November 2013 [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://www.3glteinfo.com/intra-lte-handover-using-x2-interface/>
- [6] Prashant Panigrahi. Intra-LTE Handover Using the X2 Interface. 3G lte info. [online]. 2013 [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://www.3glteinfo.com/intra-lte-handover-using-x2-interface/>
- [7] Quick Summary of LTE Voice Summit 2015 (LTEVoice). The 3G4G Blog. [online]. Sunday, 1 November 2015 [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://blog.3g4g.co.uk/2015/11/quick-summary-of-lte-voice-summit-2015.html>
- [8] CISCO Wi-Fi Calling and the Support of IMS Services over Carrier Wi-Fi Networks In-text: (Cisco, 2015) Bibliography: Cisco, (2015). Wi-Fi Calling and the Support of IMS Services over Carrier Wi-Fi Networks. [online] Available at: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/service-provider-wi-fi/white-paper-c11-733136.html> [Accessed 15 Dec. 2015].
- [9] A. Pyattaev et al., “Proximity Based Data Offloading via Network Assisted Device-to-device Communications,” IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC-Spring), Dresden, Germany, June 2–5, 2013, pp. 1–5.
- [10] E. Seidel, 3GPP LTE-A Standardisation in Release 12 and Beyond, Nomor Research GmbH, Munich, Germany, 2013.
- [11] 3GPP SP-110638, LTE Proximity-Based Services Study Item, Sep. 2011.

- [12] MEDNIEKS, Z., DORMIN, L., MEIKE G. B., NAKAMURA M., Programming Android, USA, 2012, O'Reilly, ISBN: 978-1-449-31664-8
- [13] T. Doumi et al., "LTE for Public Safety Networks," IEEE Commun. Mag., vol. 51, no. 2, Feb. 2013, pp. 106–112.
- [14] F.M. Abinader et al., "Enabling the Coexistence of LTE and Wi-Fi in Unlicensed Bands," IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 11, Nov. 2014, pp. 54–61.
- [15] 3GPP TR 36.843, Study on LTE Device to Device Proximity Services; Radio Aspects, Mar. 2014.
- [16] 3GPP TS 23.234, 3GPP System to Wireless Local Area Network (WLAN) Interworking; Syst. Description, Mar. 2011.
- [17] 3GPP TS 23.327, Mobility Between 3GPP-Wireless Local Area Network (WLAN) Interworking and 3GPP Systems, Mar. 2011.
- [18] Prokop, M. (2015). Wi-Fi: Jak si zajistit velké pokrytí, rychlost a silný signál - 2 .kapitola – Živě.cz. [online] Živě.cz. Available at: <http://www.zive.cz/clanky/wi-fi-jak-si-zajistit-velke-pokryti-a-silny-signal/anteny-a-jejich-nastaveni-deformace-a-ztrata-signalu-mereni/sc-3-a-172347-ch-90933/default.aspx> [Accessed 15 Dec. 2015].
- [19] Typy bezdrátových sítí [online]. 2010 [cit. 2010-03-07]. Budnet. Dostupné z WWW: <http://budnet.eu/sec/?p=306>
- [20] PUŽMANOVÁ, R. Moderní komunikační sítě od A do Z: 2. aktualizované vydání. Brno: Computer Press, 2006. 430 s. ISBN 80-251-1278-0
- [21] FSO – optika bez kabelů. [online]. Brno: UNIS COMPUTERS, [2005]. [cit. 2009-02-20] Dostupný z: [http://www.uniscomp.cz/free-spaceoptics/page.php?def=hi\\_technology&idmenu=63&idtext=46](http://www.uniscomp.cz/free-spaceoptics/page.php?def=hi_technology&idmenu=63&idtext=46)
- [22] m0n0wall. [online]. Switzerland: Manuel Kasper, [2009] [cit. 2009-05-20]. Dostupný z: <http://m0n0.ch/>
- [23] i4wifi a.s. [online]. Praha: i4wifi a.s., [2009]. [cit. 2009-05-28] Dostupný z: <http://www.i4wifi.cz/>
- [24] Cs.wikipedia.org, (2015). Wikipedia. [online] Available at: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Hlavn%C3AD\\_strana](https://cs.wikipedia.org/wiki/Hlavn%C3AD_strana) [Accessed 15 Dec. 2015].

- [25] BRADÁČ, Z., FIEDLER, P., KACMÁR, M. Bezdrátové komunikace v automatizační praxi I: historie a současnost. Automa [online]. 2009 [cit. 2009- 12- 03]. Dostupný z WWW: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=28818](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=28818)
- [26] Haijun Zhang is with College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, P. R. China, and is also with the Department of Electrical and Computer Engineering, the University of British Columbia, Vancouver, BC, V6T 1Z4, Canada (Email: dr.haijun.zhang@ieee.org). Xiaoli Chu is with Department of Electronic and Electrical Engineering, the University of Sheffield, Sheffield S1 3JD, UK (Email: x.chu@sheffield.ac.uk). Weisi Guo is with School of Engineering, University of Warwick, CV4 7AL, UK (Email: weisi.guo@warwick.ac.uk). Siyi Wang is with the Department of Electrical and Electronic Engineering, Xi'an Jiaotong-Liverpool University, China; and the Institute for Telecommunications Research, University of South Australia, Australia. (Email: siyi.wang@xjtlu.edu.cn).
- [27] Advanced Science and Technology Letters Vol.42 (Mobile and Wireless 2013), pp.5-8 Kwang Kiun Yoo, Ronny Yongho Kim,a Korea National University of Transportation ,bDepartment of Railroad Electrical and Electronics Engineering, Uiwang, Gyeonggi, 437-763 Korea ,a Corresponding Author: ronnykim@ut.ac.kr <http://dx.doi.org/10.14257/astl.2013.42.02> ISSN: 2287-1233
- [28] Ericsson review, Ericsson review (English ed.) Telefonaktiebolaget LM Ericsson, 1924, ISSN 0014-0171 1995-2002 / sign. FČ-0071.034
- [29] 4G Americas Integration of Cellular and Wi-Fi Networks September 2013
- [30] Christoph Paasch, Gregory Detal, Fabien Duchene, Costin Raiciu, and Olivier Bonaventure. Exploring mobile/WiFi handover with Multipath TCP. In Proceedings of the 2012 ACM SIGCOMM workshop on Cellular networks: operations, challenges, and future design, CellNet '12, pages 31-36, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [31] BEZPALEC, P.LTE (Long Term Evolution)In-text: (Bezpalec, 2017) Your Bibliography: Bezpalec, P. (2017). LTE (Long Term Evolution). 1st ed. Praha: České vysoké učení technické v Praze.
- [32] Support, T., Quality, V., Alerts, T. and TechNotes, T. (2017). Voice Over IP - Per Call Bandwidth Consumption. Cisco. Available at:



<https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/voice/voice-quality/7934-bwidth-consume.html>

- [33] ISM BAND, In-text: (En.wikipedia.org, 2017) Your Bibliography: En.wikipedia.org. (2017). ISM band. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/ISM\\_band](https://en.wikipedia.org/wiki/ISM_band)

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

$f_v$  vzorkovací kmitočet

- **FHSS** – Frequency Hopping Spread Spectrum
- **DSSS** – Direct Sequence Spread Spectrum
- **PBCC** - Packet Binary Convolutional Coding
- **OFDM** – Orthogonal Frequency Division Multiplexing
- **QAM** – Packet Binary Convolution Coding
- **QPSK** - Quadrature Phase Shift Keying
- **GMSK** - Gaussian Minimum Shift Keying
- **FSK** - Frequency-Shift Keying
- **PSK** - Phase-Shift Keying
- **MSK** - Minimum Shift Keying

VoIP LTE IEEE 802.11 QoS VoLTE VoWiFi ISM AM FM IrDA

# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A Přílohy</b>	<b>75</b>
A.1 Tabulka ISM pásma . . . . .	75

## A PŘÍLOHY

### A.1 Tabulka ISM pásma

Frequency range		Bandwidth	Center frequency	Availability	Licensed users
6.765 MHz	6.795 MHz	30 kHz	6.780 MHz	Subject to local acceptance	<a href="#">Fixed &amp; Mobile services</a>
13.553 MHz	13.567 MHz	14 kHz	13.560 MHz	Worldwide	Fixed & Mobile services
26.957 MHz	27.283 MHz	326 kHz	27.120 MHz	Worldwide	<a href="#">Citizens band radio</a> <sup>[a]</sup>
40.660 MHz	40.700 MHz	40 kHz	40.680 MHz	Worldwide	Fixed & Mobile services
433.050 MHz	434.790 MHz	1.74 MHz	433.920 MHz	<a href="#">Region 1</a> only and subject to local acceptance	<a href="#">Amateur Radio (70 cm band)</a> & Radar
902.000 MHz	928.000 MHz	26 MHz	915.000 MHz	<a href="#">Region 2</a> only (with some exceptions)	Amateur Radio (33 cm band), Mobile services & Radar
2.400 GHz	2.500 GHz	100 MHz	2.450 GHz	Worldwide	Amateur Radio (13 cm band), <a href="#">Microwave links</a> & Radar
5.725 GHz	5.875 GHz	150 MHz	5.800 GHz	Worldwide	Amateur Radio (5 cm band), <a href="#">Earth stations</a> , Microwave links & Radar
24.000 GHz	24.250 GHz	250 MHz	24.125 GHz	Worldwide	Amateur Radio (1.2 cm band) & Radar ( <a href="#">K band Radar guns</a> )
61.000 GHz	61.500 GHz	500 MHz	61.250 GHz	Subject to local acceptance	Microwave links & Radar
122.000 GHz	123.000 GHz	1 GHz	122.500 GHz	Subject to local acceptance	Amateur Radio ( <a href="#">2.5 mm band</a> ) & Microwave links
244.000 GHz	246.000 GHz	2 GHz	245.000 GHz	Subject to local acceptance	Amateur Radio (1 mm band), Radar & <a href="#">Radio Astronomy</a>

Obr. A.1: Tabulka ISM pásma [33]